

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VÝVOJ TECHNOLOGIE DMLS TISKU TENKOSTĚNNÝCH KONSTRUKCÍ**

**THE DEVELOPMENT OF PRINT THIN-WALLED CONSTRUCTION BY DMLS  
TECHNOLOGY**

Autor: Bc. Vojtěch Balcárek  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.

PRAHA 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Balcárek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **420525**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vývoj technologie DMLS tisku tenkostěnných konstrukcí**

Název diplomové práce anglicky:

**The development of print thin-walled construction by DMLS technology**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky aditivních technologií
2. Numerické simulace v oblasti aditivních technologií
3. Návrh experimentální části, včetně analýzy technologičnosti konstrukce
4. Analýza geometrických, tvarových a mechanických vlastností vytištěných vzorků
5. návrh vhodné tiskové technologie s cílem optimalizovat tvarové deformace
6. Závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne: .....

.....

Bc. Vojtěch Balcárek

## Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D., za odborné vedení, poznatky a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Bakalářovi za poskytnutí simulačního softwaru.

# Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou 3D tisku tenkostěnných kovových konstrukcí zhotovených za pomoci aditivní technologie Direct Metal Laser Sintering. Kromě DMLS jsou v práci popsány i jiné technologie a zmapovaný vývoj aditivních technologií obecně. Cílem je najít optimální tiskovou strategii pro tisk tenkostěnných vzorků. Za tímto účelem jsou navrženy zkušební vzorky z korozivzdorné oceli AISI 316L. Tyto vzorky se tisknou čtyřmi různými tiskovými strategiemi, speciálně vybranými pro tenkostěnné konstrukce. Každá ze strategií má přesně dané tiskové parametry. Vzorky jsou určeny pro zkoušku tahem, která prozradí mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků. Vedle zkoušky tahem jsou vzorky navíc podrobeny numerickým simulacím, které zobrazí napětí a deformační posuv ve vzorcích. Na základě zjištěných výsledků jsou vzorky porovnány s parametry, které udává výrobce kovového prášku. Hlavní však je porovnání tiskových strategií vzájemně mezi sebou. Výsledky ze simulačního softwaru jsou velice vyrovnané, a proto se rozhoduje na základě výsledků z tahové zkoušky.

## Klíčová slova

aditivní technologie, DMLS, tenkostěnné konstrukce, zkouška tahem, numerické simulace

# Abstract

The diploma thesis deals with the issue of 3D printing of thin-walled metal constructions made by using the additive technology Direct Metal Laser Sintering. In addition to DMLS, other technologies and mapped development of additive technologies in general, are described in the work. The goal is to find the optimal printing strategy for printing thin-walled constructions. For this purpose, test samples made of AISI 316L stainless steel were designed. These samples are printed with four different printing strategies, specially selected for thin-walled constructions. Each of the strategies has precisely given printing parameters. The samples are intended for tensile testing, which reveals the mechanical properties of individual samples. In addition to the tensile test, the samples are subjected to numerical simulations that show stress and displacements. Based on the results, the samples are compared with the parameters specified by the metal powder manufacturer. The main thing, however, is to compare printing strategies with each other. The results from the simulation software are very balanced, and therefore it is decided based on the results from the tensile test.

## Keywords

additive technology, DMLS, thin-walled construction, tensile test, numerical simulation

# Obsah

1.	Úvod .....	9
2.	Aditivní technologie .....	10
2.1.	Historie a vývoj 3D tisku .....	10
2.2.	Přehled aditivních technologií.....	12
2.2.1.	Direct Metal Laser Sintering .....	13
2.2.2.	Electron Beam Melting .....	16
2.2.3.	Binder Jetting .....	17
2.2.4.	Direct Energy Deposition .....	18
2.2.5.	Metal Injection Moulding .....	19
2.3.	Přehled materiálů.....	21
2.3.1.	Plastové materiály .....	21
2.3.2.	Kovové materiály .....	22
2.3.3.	Ostatní materiály .....	25
3.	Technologičnost konstrukce .....	27
3.1.1.	Pravidla konstrukce DMLS dílu .....	27
3.1.2.	Strategie tisku .....	33
3.1.3.	Parametry tisku.....	36
4.	Optimalizace za pomoci simulace.....	39
4.1.1.	Metoda konečných prvků (MKP) .....	41
4.2.	Simulační software .....	42
4.2.1.	Ansys Additive.....	42
4.2.2.	Simufact Additive .....	44
4.2.3.	Altair Inspire Print3D .....	45
4.2.4.	Dassault Systèmes Simulia .....	47
5.	Praktická část .....	48
5.1.	Úvod do problematiky.....	48
5.2.	Návrh vzorku .....	48
5.3.	Tisk vzorků.....	50
5.3.1.	Tiskové parametry .....	50
5.3.2.	Poloha součásti .....	53

5.3.3.	Výrobní zařízení – Renishaw AM250 .....	55
5.4.	Zkouška tahem .....	56
5.4.1.	Zkušební těleso pro zkoušku tahem .....	59
5.4.2.	Zkušební zařízení pro zkoušku tahem.....	62
5.4.3.	Vyhodnocení zkoušky tahem .....	63
5.5.	Simulace .....	79
5.5.1.	Vyhodnocení simulací .....	80
6.	Závěrečné zhodnocení .....	85
	Seznam zdrojů.....	87
	Seznam obrázků .....	92
	Seznam tabulek.....	95
	Seznam grafů .....	96
	Seznam zkratk .....	97



# 1. Úvod

Aditivní technologie je termín označující výrobu, při které dochází k počítačem řízenému spojování materiálu podle dat na základě CAD modelu a vzniká finální objekt. Většina dílů se vytváří postupným nanášením materiálu v tenkých vrstvách, které se skládají na sebe. Samotné vrstvení se někdy označuje také jako 3D tisk. To je zásadní rozdíl oproti subtraktivní výrobě, která spočívá v odebrání materiálu z polotovaru. Rozdíl je také ve značné úspoře materiálu. Aditivní technologie se vyznačuje malým množstvím odpadu a zároveň je možné zhotovovat tvarově velice složité výrobky, které jinou metodou vyrobít nelze. Za nevýhody technologie se považuje omezený pracovní prostor, ve kterém se objekt tiskne, což znamená omezenou velikost výsledných součástí. Tvarová přesnost a jakost povrchu je dána materiálem, ze kterého se tiskne, a v závislosti na materiálu se volí technologie samotného tisku. Aditivní technologií je možné vyrábět součásti z kovu, plastu i jiných materiálů. V současnosti je technologie hojně využívána ve strojírenství, zdravotnictví, leteckém a automobilovém průmyslu. Kromě rapid prototyping a kusové výroby se aditivní technologie začíná prosazovat i ve výrobě sériové.

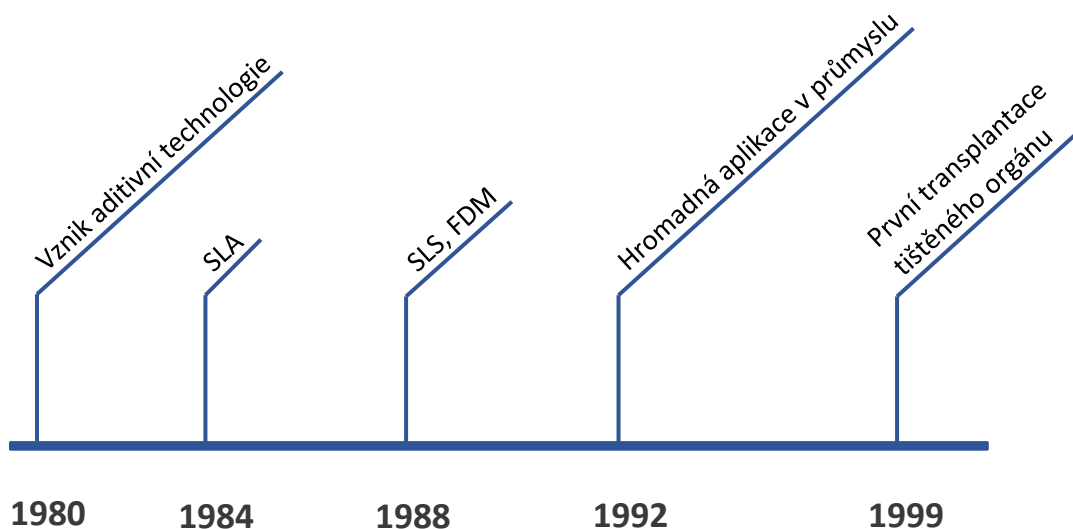
Samotný 3D tisk kovových dílů je velice široká a rychle se rozvíjející oblast výrobního průmyslu. Díl z kovu je možné vytisknout velkou spoustou tiskových technologií a každá z nich je ovlivněna několika parametry tisku. Pro tisk konkrétní součásti s určitými vlastnostmi se hodí jen vybraná skupina technologií a volba ideálních tiskových parametrů není snadná. Značnou pomoc nabízejí simulační softwary, které pomáhají optimalizovat konstrukci i tiskové parametry.

## Cíle práce

- Zmapování technologie DMLS a aditivních technologií obecně
- Aplikace numerických simulací v oblasti aditivních technologií
- Návrh zkušební vzorku a analýza technologičnosti konstrukce
- Analýza geometrických a mechanických vlastností vytisknutých vzorků
- Návrh vhodné tiskové strategie s cílem optimalizovat tvarové deformace

## 2. Aditivní technologie

### 2.1. Historie a vývoj 3D tisku



Obrázek 1: Časová osa vývoje 3D tisku

Aditivní technologie se začala poprvé objevovat už v roce 1980, kdy podal žádost o patent japonský vědec Hideo Kodama. Patent obsahoval popis systému vytvrzování tekutého polymeru laserovým paprskem. Systém byl podobný dnes známé technologii SLA tiskáren, kdy dochází k vytvrzení fotopolymeru za pomoci UV záření. Kodamův patent však nebyl schválen [1, 2].

V roce 1984 Jean-Claude André, Olivier de Witte a Alain le Méhauté z Francie přišli s první tiskárnou, která byla schopna vyrobit první aditivní objekt. Následná žádost o patent skončila pro trio neúspěchem z důvodu nemožnosti projekt financovat [1, 2].

Tentýž rok, v roce 1984, si Američan Charles Hull nechal patentovat stereolitografii (SLA) a o dva roky později založil společnost 3D Systems. První tiskárnou, kterou kalifornská společnost vyrobila se stala SLA-1. Od tohoto okamžiku začala éra aditivních technologií v průmyslu [1, 2].

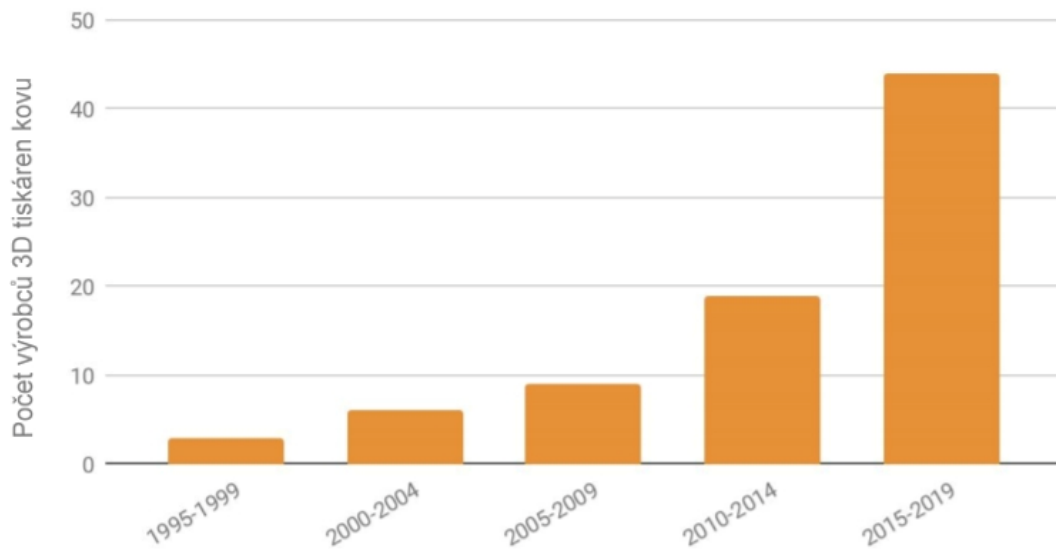
Doposud byla vesměs vyvíjena pouze technologie SLA, ale v roce 1988 byla vynalezena další aditivní technologie. Šlo o selektivní laserové slinování (SLS), kterou si nechal patentovat student texaské univerzity Carl Deckard. Tato technologie se stala v oblasti průmyslového 3D tisku nejvyužívanější [1, 2].

Téměř paralelně s SLS dorazila na americký patentový úřad žádost o zaregistrování technologie Fused Deposition Modeling (FDM). O patent zažádal Scott Crump. Podstata FDM se od doposud známých technologií výrazně lišila. Dochází zde k roztavení termoplastického materiálu ve formě struny v trysce, která zkapalněný materiál vrství do požadovaného tvaru [1, 2].

Masovějšího rozšíření se aditivní technologie dočkaly až s nástupem výkonnější výpočetní techniky, která umožnila vytvářet CAD modely a zajistila řízení samotného procesu tisku. Technologie se začala zdokonalovat a využívat v mnoho odvětvích [3].

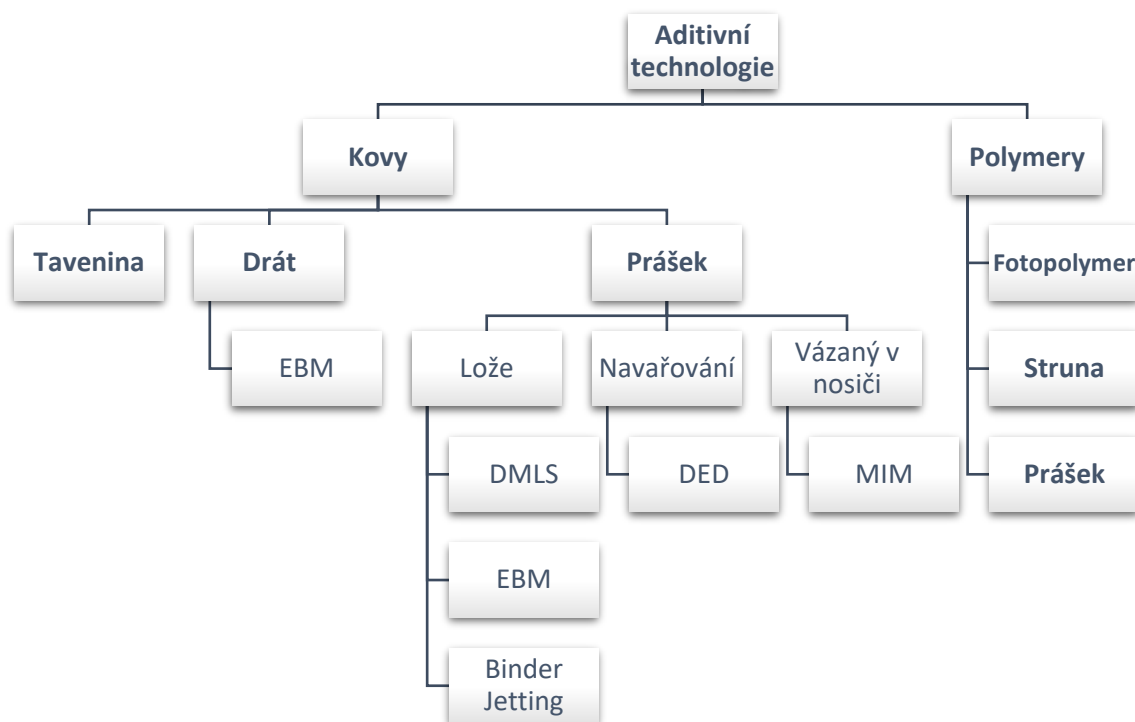
- 1992 – Použití 3D tisku při výrobě a testování prototypů součástek v automobilovém a leteckém průmyslu.
- 1999 – První transplantace tištěného orgánu potaženého lidskými buňkami.
- 2005 – Vznik projektu RepRap na principu open-source. Tiskárna schopná replikovat sama sebe.

V posledních letech zaznamenala technologie 3D tisku nejvýraznější nárůst mezi lety 2017 a 2018. Největší zásluhu na tom má trh s kovovým 3D tiskem, který v těchto letech zaznamenal 80% nárůst prodejů tiskáren. Prodeje rostly díky příchodu nových výrobců. K zavedeným značkám jako je HP, GE Additive, Renishaw nebo Desktop Metal se nově přidaly BeAM, Digital Metal, Spee3D a další. Se zvyšující se konkurencí se rozrostla nabídka a klesaly ceny systémů vyrábějících kovové díly [4].



Graf 1: Nárůst výrobců 3D tiskáren kovu [4]

## 2.2. Přehled aditivních technologií



Obrázek 2: Přehled aditivních technologií

## 2.2.1. Direct Metal Laser Sintering

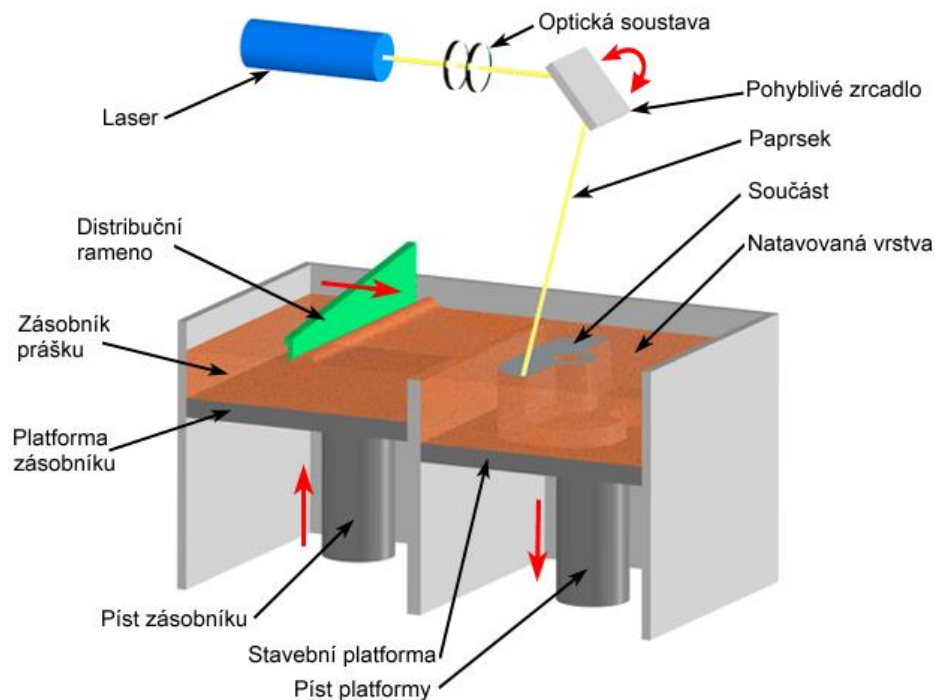
### Vývoj metody DMLS

Podstatou metody je natavování kovového prášku laserem. Počátky laserového spékání však najdeme u plastů, které je známé od roku 1986. V roce 1988 se Frank Arcella ze společnosti Westinghouse Electric zasloužil o přenesení tohoto způsobu natavování i na kovový prášek. Natavovány byly prášky z korozivzdorné oceli, hliníku a titanu. Zdrojem tepla byl CO<sub>2</sub> laser a proces tisku probíhal vrstvu po vrstvě v ochranné atmosféře [5].

O komercializaci technologie laserového spékání kovového prášku se postarala v roce 1992 americká společnost DTM Corporation. Na trh uvedla zařízení Sinterstation 2000. O dva roky později německá společnost EOS GmbH představila zařízení EOSINT (P) 350. Obě zařízení pracovala se stejně výkonným laserem, ale lišila se například v technice kladení vrstev nebo ve velikosti pracovního prostoru. Postupem času začaly vznikat i další společnosti zabývající se technologií laserového spékání kovového prášku a zvyšoval se tak výkon laserů až na dnes běžně používaných 400 W [5].

### Princip metody DMLS

Technologie Direct Metal Laser Sintering umožňuje vytvářet objekty z kovu na základě dat z 3D CAD modelu. Objekt je tvořen postupným nanášením tenkých vrstev práškových kovů, které jsou následně natavovány koncentrovaným paprskem laseru. Každá vrstva je tavena tak, aby odpovídala geometrii CAD modelu. Jemnost prášku a přesnost laseru umožňuje rychlou výrobu i tvarově velice složitých součástí bez použití jakýchkoliv nástrojů nebo přípravků. S rostoucí tvarovou složitostí součástí vzrůstá ekonomická efektivita metody DMLS. Nanesený prášek, který nebyl nataven, lze znovu použít. Odpad se tedy tvoří až ve fázi dokončovací, kde se apretují nezbytné podpory, případně upravuje povrch součásti [6].



Obrázek 3: Princip metody DMLS [7]

Na podobném principu fungují i příbuzné metody:

- DMLM – Direct Metal Laser Melting – přímé kovové laserové tavení
- SLM – Selective Laser Melting – selektivní laserové tavení
- SLS – Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání

Výrobu dílu metodou DMLS lze rozdělit do třech fází. Preprocessing, processing a postprocessing [8, 9].

Preprocessing spočívá v přípravě prášku, který se před umístěním do zásobníku musí prosít, aby velikost zrn odpovídala zvolenému rozsahu. Když je zásobník naplněn, může plnit svou funkci – dodávat médium do prostoru stavební platformy. Stavební platforma musí být vybroušená a zbavena nečistot z předchozího tisku. Dalším krokem je příprava dat, tedy import CAD modelu vyráběného dílu, která jsou nahrána do řídicího systému. Soubor musí obsahovat kromě modelu samotného také podpůrný systém a tiskové parametry. Následuje kontrola datového souboru z důvodu uzavření objemu součásti pomocí trojúhelníkové sítě a výběr optimální výrobní pozice dílu. Software podle zvolených parametrů tisku rozčlení model do jednotlivých vrstev, které bude následně

skládat na sebe. Před zahájením tisku je potřeba z komory odčerpat vzduch a naplnit ji inertním plynem, aby nedošlo ke znehodnocení prášku [8, 9].

Druhou fází je processing. Tato fáze začíná nanesením média na tiskovou platformu. Jedná se o velice náročný krok. Nanést rovnoměrnou vrstvu prášku například o tloušťce 0,02 mm není nic jednoduchého a výrobci to řeší různými způsoby – například keramickým břitem. Po nanesení patřičné vrstvy média začne vláknový laser o výkonu 200 nebo 400 W natavovat prášek přesně podle dat z řídicího systému. Paprsek se pohybuje v souřadnicích X a Y. Osa Z je řízena posunem stavební platformy a pohybuje se o výšku vrstvy. V průběhu tisku je součást fixována pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k platformě a pomáhá odvádět teplo ze spékané vrstvy [8, 9].

Fáze postprocessingu nastává po dotisknutí dílu. Celá stavební platforma se vyjme z pracovního prostoru a oddělí se z ní hotový díl. Nenatavený prášek je odsán a po prosetí může být znovu použit. Z vytisknuté součásti se musí odstranit podpůrné struktury. Povrch výtisku lze dále upravovat tryskáním, broušením nebo obráběním dle potřeby [8, 9].

## **Výhody a nevýhody DMLS**

### **Výhody**

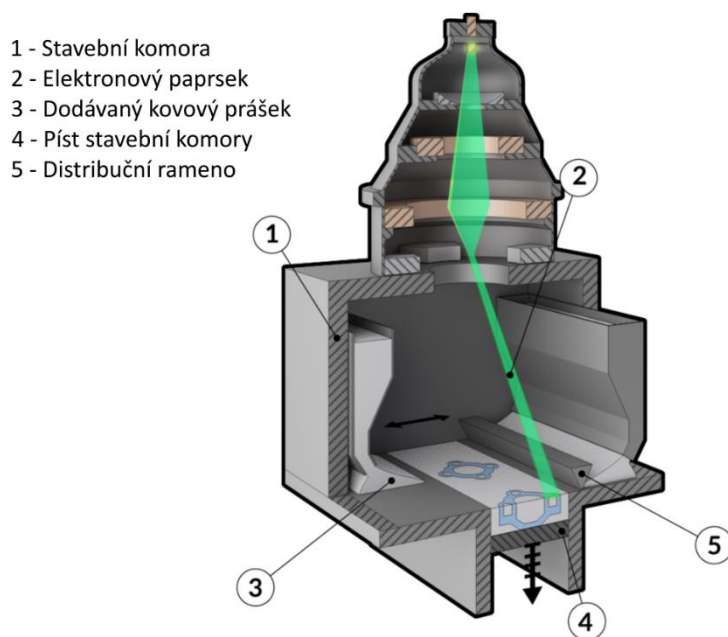
- Výroba součásti přímo z 3D CAD dat
- Plně automatický provoz výrobního zařízení
- Vysoká geometrická flexibilita (možnost vyrábět díly, které konvenčními technologiemi vyrobit nelze)
- Minimální množství odpadového materiálu

### **Nevýhody**

- Velikost součásti je limitovaná pracovním prostorem tiskárny
- Nutnost dokončovacích operací
- Vysoká energetická náročnost procesu

## 2.2.2. Electron Beam Melting

Při procesu EBM dochází k tavení tenké vrstvy prášku, případně drátu, za pomoci výkonného elektronového paprsku. Paprsek je tvořen koncentrovaným svazkem elektronů a je řízený elektromagnetickými cívkami, které dokážou koncentrovat paprsek do potřebného místa na pracovní ploše. Samotné elektrony vznikají díky rozžhavené elektrodě a jsou urychleny na poloviční rychlost světla. Celý proces probíhá ve vakuu při teplotě až 2000 °C. Vakuum zabraňuje oxidaci média, ze kterého se tiskne. Vysoká teplota zase zajišťuje snížení zbytkových napětí ve vyráběné součásti. Technologie EBM přináší nový způsob, jak spojovat práškový materiál a své využití nachází v medicíně, leteckém i automobilovém průmyslu. Mezi výhody se řadí vysoká přesnost a možnost využití jak kovového prášku, tak drátu. Nevýhody jsou: složitost zařízení, vysoké pořizovací náklady a potřeba vysoké čistoty tiskového materiálu [10, 11].

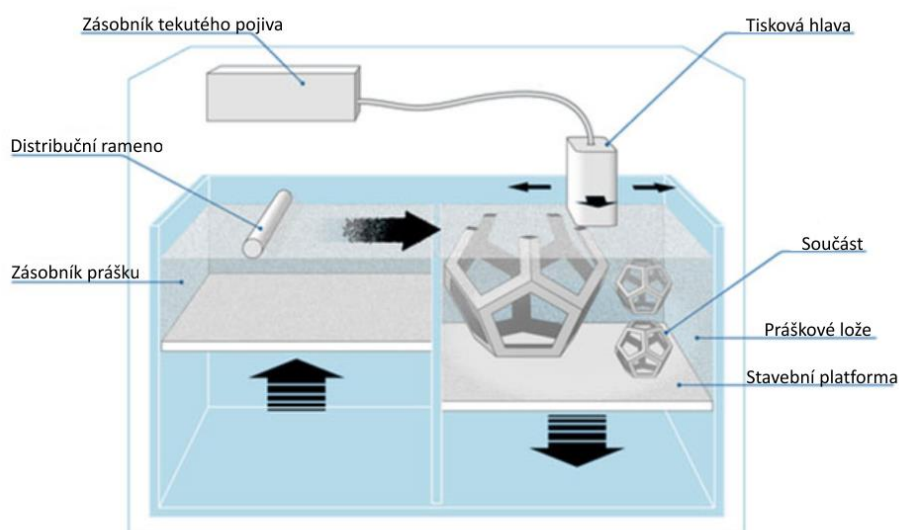


Obrázek 4: Princip metody EBM [12]



### 2.2.3. Binder Jetting

Jedná se o proces aditivní výroby (AM – additive manufacturing), při kterém se vrství médium ve formě prášku, podobně jako u jiných aditivních technologií, ale nedochází k jeho natavování nebo spékání, nýbrž spojení kapalným pojivem. Nejdříve se nanese tenká rovnoměrná vrstva prášku. Následně je tiskovou hlavou, která se pohybuje v osách X a Y, nanášeno pojivo na lože prášku. Pohyb v ose Z je opět zajištěn posuvem stavební platformy, podobně jako u dalších metod. Postupným vrstvením a spojováním vznikne finální tvar součásti na základě dat z 3D CAD modelu. Při Binder Jettingu nevznikají velké deformační síly, tudíž nejsou zapotřebí podpůrné struktury a objekt nemusí být pevně spojen se stavební platformou. To znamená, že do pracovního prostoru můžeme umísťovat součásti nejen vedle sebe, ale i nad sebe. Dalším velkým benefitem této technologie je možnost tisknout z různých materiálů. Pojivy lze spojovat kovový, keramický nebo polymerní materiál. V případě kovů je důležité umístit vytisknuté součásti do pece, kde dojde ke spálení pojiva a drobné částičky kovu se slinují dohromady. Binder Jetting umožňuje tisknout i barevné objekty, stačí do pojiva přidat barvivo [13, 14].

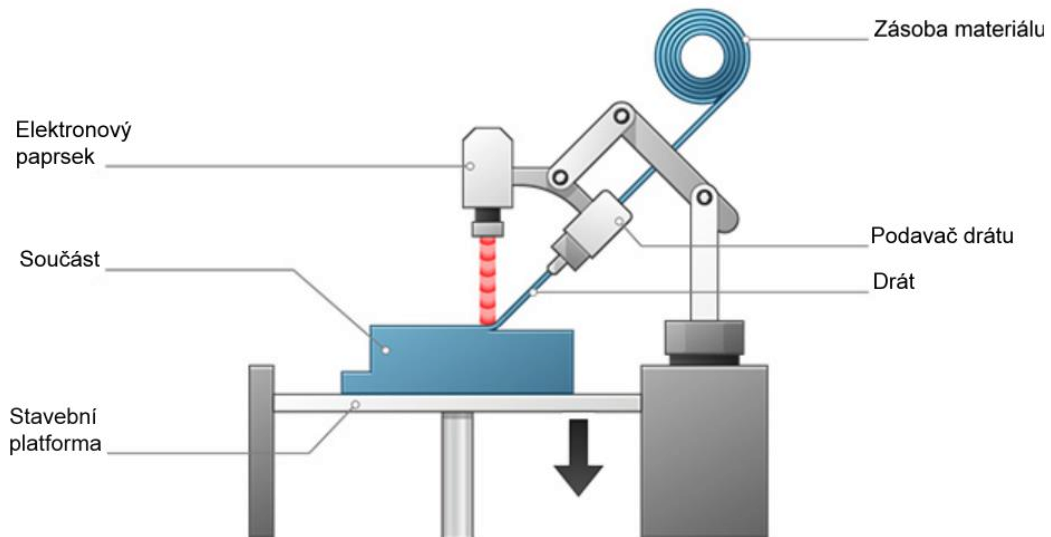


Obrázek 5: Princip metody Binder Jetting [14]

## 2.2.4. Direct Energy Deposition

Technologie DED je proces 3D tisku, který se obvykle používá k opravě nebo úpravě stávající součásti. Nejčastěji se aplikuje na opravu poškozených lopatek turbín nebo vrtulí. Lze ji aplikovat i na kompletní tisk nové součásti, ale v tom není DED příliš efektivní [15].

Princip Direct Energy Deposition spočívá v tavení materiálu za pomoci laserového, nebo elektronového paprsku. Materiál je do místa tavení dodáván ve formě drátu, případně proudem plynu, který unáší kovový prášek. Paprskem roztavený materiál se vrství a vytváří požadovanou strukturu. Celý tento mechanismus bývá umístěný na čtyř až pětiosém rameni, a tudíž ho lze provozovat ve všech polohách. Při provozu systému založeném na elektronovém paprsku musí být proces prováděn ve vakuu, aby se zabránilo interakci elektronů s molekulami vzduchu. V případě práce s laserem a reaktivními kovy většinou postačí použití ochranné atmosféry v okolí místa tavení [15].



Obrázek 6: Princip metody DED [15]

## 2.2.5. Metal Injection Moulding

Technologie MIM umožňuje vyrábět menší kovové díly ze široké škály kovových materiálů. Jedná se o metodu, při níž se kov ve formě prášku mísí s pojivou (binders). Pojivo, které má zároveň funkci nosiče prášku, je nataveno a směs je vytvarována do požadovaného tvaru. Následuje odstranění pojiva (debinding) a slinování kovu v peci. Mezi výhody MIM lze zařadit kvalitu finálního povrchu dílu, materiálovou flexibilitu a nižší náklady na provoz [16].

### Studio System

Společnost Desktop Metal vyvinula první kancelářský 3D tiskový systém s názvem Studio System, který je založený na technologii Metal Injection Moulding. Třídílná sestava je určena pro rychlé prototypování a slibuje i ekonomičtější provoz než ostatní aditivní technologie vyrábějící součásti z kovu. Aby byl systém bezpečný pro provoz v kancelářských prostorách, nepoužívá pro tisk laser ani prášky. Na rozdíl od jiných systémů není vyžadováno žádné speciální prostředí či vybavení, je potřeba pouze napájení a připojení k internetu pro vzdálenou obsluhu. Oproti technologiím využívajících selektivní tavení prášku laserem, Studio System vytlačuje tyčinky z kovového prášku stmelené polymerem. Pro snadnější obsluhu a manipulaci jsou tyčinky umístěny v plastové kazetě. Po vytlačení do příslušného tvaru se objekt umístí do takzvaného debinderu, kde se odstraní základní pojivo a součást se připraví na fázi poslední, na slinování. To probíhá v peci, v níž je teplota těsně pod teplotou tání daného materiálu. V peci dojde ke spojení kovových částic v homogenní díl bez zbytkového napětí. Celá technologie se tedy skládá ze tří procesů a probíhá postupně ve třech zařízeních. V tiskárně, debinderu a peci. Výrobce přizpůsobil rozměry všech tří zařízeních tak, aby prošly kancelářskými dveřmi. To dokazuje, že se skutečně jedná o nástroj pro rychlé prototypování [17, 18].



Obrázek 7: Studio System (tiskárna, debinder, pec) [19]

## **Metal X**

Systém Metal X od společnosti Markforged je přímou konkurencí pro výše uvedený Studio System. Metal X využívá technologii kombinující MIM a FFF (Fused Filament Fabrication), ta je známá z běžných tiskáren tisknoucích natavením plastové struny. Společnost tuto kombinaci nazývá ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). Největší rozdíl mezi Metal X a Studio Systémem je ve tvaru výchozího materiálu. Metal X má kovový prášek vázaný v pojivu ve tvaru struny, která se odvíjí ze špulky a Studio System využívá tyčinek naskládaných v kazetovém zásobníku [20, 21].

Samotné tisknutí probíhá tradičně vrstvu po vrstvě z natavené struny s kovovým práškem. Model musí být adekvátně zvětšen, aby se kompenzovalo smrštění, ke kterému dojde v závěrečné fázi výroby. Tou je slinování. Při slinování v peci se kovové částice pevně spojí a pojivo vypálí. Na závěr procesu se provádějí dodatečné úpravy – odstraňování dočasných podpor, případně úpravy povrchu [20, 21].

## 2.3. Přehled materiálů

3D tisk je velice progresivně se rozšiřující technologie. Tiskové parametry, jako jsou tvarová složitost a rozměry výtisků, se neustále zlepšují. Dopředu se posouvá i nejdůležitější oblast 3D tisku, materiály. Velké množství technologií aditivní výroby nám umožňuje tisknout z téměř jakéhokoliv materiálu od plastu přes kov a keramiku až po živé tkáně. Materiál udává vlastnosti a podobu hotové součásti, a proto se dle potřeby volí materiály tvrdé, houževnaté, nebo například biokompatibilní.

Valná většina technologií aditivní výroby využívá roztavení materiálu a tvarování dle virtuální předlohy. Pro dosažení kvalitního výsledku je třeba zvolit správné tiskové parametry s přihlédnutím ke zvolenému materiálu.

### 2.3.1. Plastové materiály

3D tisk z plastových materiálů je méně nákladný oproti tisku kovových dílů. Levnější jsou jak samotné tiskárny, tak i jejich provoz. Nejrozšířenější technologie Fused Deposition Modeling, která spočívá v natavení materiálu ve formě struny a postupného vrstvení na stavební platformu. Tato technologie k tisku využívá hlavně ekologické PLA a odolné ABS. V obou případech se jedná o termoplastické materiály [22].

## **ABS** (akrylonitrilbutadienstyren)

Jedná se o amorfní termoplastický kopolymer, který odolává mechanickým poškozením, kyselinám a výkyvu teplot. ABS se dobře opracovává a má malou nasákavost. Naopak nevýhodou je značná tepelná roztažnost, se kterou je třeba při tisku počítat. ABS se používá pro výrobu funkčních prototypů a součástí [22].



*Obrázek 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [23]*

## **PLA** (polylactic acid)

PLA je biologicky plně odbouratelný materiál, vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Při tisku z tohoto materiálu není třeba používat vyhřívanou podložku, protože PLA má nízkou tepelnou roztažnost. Oproti ABS je křehký, navlhá a již od 60 °C přechází do plastického stavu [22].

### **2.3.2. Kovové materiály**

Prášková metalurgie je pojem, který označuje zhutnění kovu ve formě prášku za pomoci tlaku a vysoké teploty. Vlivem těchto činitelů vznikne z jemného prášku pevná součást. Do oblasti práškové metalurgie spadají technologie jako jsou izostatické lisování za tepla (HIP), vstřikovací lití kovů (MIM) a plazmové sintrování (SPS). Jedná se o velice přesné technologie, které jsou schopny docílit téměř finálního tvaru navržené součásti. Tudíž snižují náklady na další úpravy a minimalizují objem odpadového materiálu [24].

V oblasti aditivní výroby, konkrétně u technologie Direct Metal Laser Sintering, se primárně jako stavební materiál používají právě kovové prášky. Na rozdíl od jiných technologií, které využívají ohřev na vysokou teplotu a lisování, se pro spékání částic

využívá energie vysokovýkonného laseru. Zásadním parametrem je velikost částic prášku. Ta se u technologie DMLS pohybuje v rozmezí od 15 do 45  $\mu\text{m}$ . Takto jemný prášek umožňuje přesné dávkování a vrstvení. Vedle jemnosti je při výrobě prášku kladen důraz na tvar částic. Sférické částice totiž dosahují lepšího zhuštění [24].



Obrázek 9: Velikost zrna práškového kovu [24]

Pro kovovou aditivní výrobu se nejčastěji používají nerezové oceli, slitiny titanu, slitiny hliníku nebo Inconel. Společným jmenovatelem všech materiálů je zaručená svařitelnost [24].

### **Nerezová ocel AISI 316L (EN 1.4404, X2CrNiMo17-12-2)**

Jedná se o austenitickou korozivzdornou ocel s nízkým obsahem uhlíku. Tento materiál je vhodný k tisku díky své dobré tepelné vodivosti a tvárnosti. Mezi klíčové vlastnosti patří korozivzdornost, vysoká pevnost, tvrdost, houževnatost a možnost dosáhnout lesklého vzhledu. Vytisknuté díly z této oceli nacházejí uplatnění ve zdravotnictví, při výrobě odolných dílů strojů a nástrojů [25].

### **Titan (Ti-6Al-4V)**

Hlavní předností slitiny Ti6Al4V, která je také označována jako Titan Grade 5, je kombinace mechanických vlastností a nízké hmotnosti. Slitina je velice pevná, dobře odolává korozi a lze ji používat až do teploty 400 °C. Slitina byla vyvinuta pro letecký průmysl a následně našla uplatnění i ve zdravotnictví díky své biokompatibilitě. V aditivní výrobě je Titan Grade 5 využíván právě v letectví, pro zhotovování menších konstrukčních dílů [25].

### **Hliník (AlSi10Mg)**

Jedná se o hliníkovou slitinu vyznačující se dobrou pevností, tvrdostí a nízkou hmotností. V praxi se využívá v automobilovém průmyslu pro výrobu kompresorů klimatizací. Kromě automobilového průmyslu AlSi10Mg nachází uplatnění třeba v letectví, nicméně tisknuty jsou díly v malých sériích nebo prototypy [25].

### **Inconel (IN718)**

Součást vytisknutá z IN718 má velmi dobrou teplotní odolnost a je schopná pracovat v rozsahu teplot od -250 °C až do 650 °C. Tato niklová superslitina má také vysokou pevnost, mez v kluzu a dobře odolává korozi. Všechny tyto vlastnosti nahrávají pro výrobu součástí, které budou vystaveny extrémnímu prostředí. Jedná se například o turbíny, součástky motorů nebo kryogenní nádrže [25].



## **Výroba kovového prášku**

Kovový prášek pro potřeby aditivních technologií se vyrábí několika způsoby. Od mechanického drcení a mletí, přes elektrolýzu, chemické procesy až po atomizaci. [26]

Atomizace je fyzikálně-mechanický způsob a nejrozšířenější metoda využívaná pro výrobu kovového prášku. Podstatou atomizace je působení tlakového plynu, proudu kapaliny, nebo odstředivé síly na tekutý kov. Vlivem tohoto působení vznikají kapky, které v důsledku rychlého ochlazení tuhnou. Pro potřeby 3D tisku se prášek často vyrábí za pomoci plazmové a plynové atomizace. Oba způsoby výroby probíhají v zařízení, které se nazývá atomizér. Jde o několik metrů vysoké zařízení válcovitého tvaru, v jehož horní části je pec na tavbu vsázky a dole je sběrný koš na hotový prášek. Mezi pecí a košem je prostor, kde se vlivem ochlazení z taveniny stává tuhý prášek. Ačkoli obě technologie probíhají v atomizéru, jsou mezi nimi určité rozdíly [24, 26, 27].

- Plazmová atomizace spočívá v přivedení výchozího kovu ve formě drátu do vrchní části atomizéru, kde je drát taven plazmovým hořákem. Roztavený kov padá atomizérem, a přitom tuhne na pevné sférické částice. Vzniká tak prášek s vysokou čistotou. Většinou jde o titanové nebo zirkonové prášky [24, 26, 27].
- Plynová atomizace je způsob výroby, který začíná tavením vstupního materiálu v indukční peci umístěné ve vrchní části atomizéru. Jako vsázka slouží granulát, nebo drobné ústřižky plechu. Tavenina je následně rozstříkována za pomoci Lavalovy trysky a dusíku směrem dolů, do sběrného koše atomizéru, kde dopadá kov ve formě prášku [24, 26, 27].

### **2.3.3. Ostatní materiály**

Vedle materiálů běžně používaných v aditivní výrobě jako jsou plast a kov, se využívají i materiály méně obvyklé.

Jedním z nich je keramika. Výchozím materiálem jsou různé prášky s jílovým základem. Do výchozího materiálu lze velmi jednoduše přimíchat různá barviva a po vypálení v peci

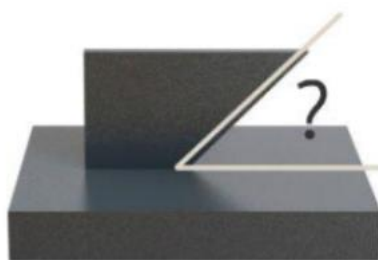
tak může vzniknout esteticky zajímavý výrobek. Toho využívají často umělci a vytváří tak keramické objekty, které dosud nebyly realizovatelné [28].

V medicíně se 3D tisk nevyužívá jen na tisk protéz nebo náhrad kostí. Tisknout lze i živé tkáně. Tisk tkání je teprve ve fázích vývoje, jelikož buňky se pohybují a následně hroubí. Nicméně vědci z Oxfordské univerzity experimentují s umístěním buněk do ochranných kapek v tukovém povlaku. Takto ošetřené buňky lze vrstvit do živých struktur [28].

## 3. Technologičnost konstrukce

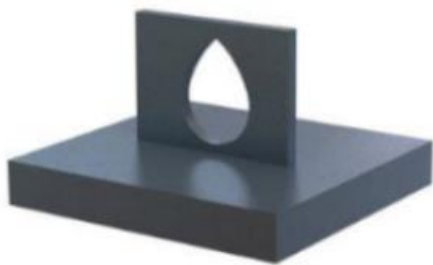
### 3.1.1. Pravidla konstrukce DMLS dílu

Při konstrukci a výběru vhodného umístění výsledného dílu na stavební platformu je třeba počítat s faktem, že samotný prášek nefunguje jako nosný prvek. Je nutné navrhnout nebo pozicovat díl tak, aby nebyly potřeba podpůrné struktury, pokud chceme zachovat dobrou jakost povrchu. V případě použití podpůrné struktury musíme počítat s následnou apretací a úpravou povrchu součásti. Vždy je dobré podpěry modelovat tak, aby styčná plocha mezi podporou a dílem byla co nejmenší. Pokud by díl, nebo jeho část nebyly podepřeny, hrozila by deformace, případně zborcení. Pro dobré podepření a zajištění tvarové přesnosti je limitní úhel  $45^\circ$ . Pokud by úhel mezi platformou a dílem byl menší, je nutné vymodelovat podpůrnou strukturu [29].

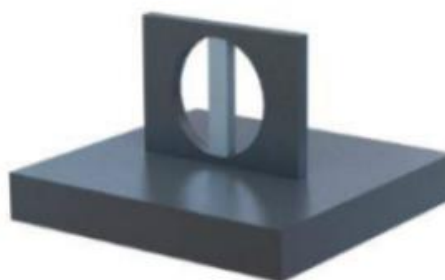


Obrázek 10: Tisk dílu se zkosením [29]

V případě tisku součásti s otvorem, závisí na velikosti otvoru, tiskových parametrech (výšce vrstvy) a materiálu prášku. Obecně platí, že otvor do průměru 6 mm lze tisknout bez podpor. Toho se často využívá pro perforování součásti a její odlehčení. V případě většího otvoru je třeba upravit konstrukci. Například užití kaprovitého otvoru, nebo vymodelovat podpůrnou strukturu [29].



*Obrázek 11: Tisk dílu s otvorem za pomoci optimalizace tvaru [29]*



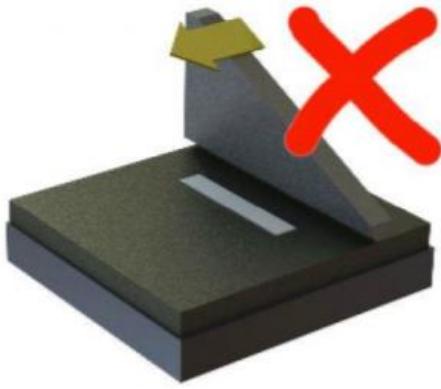
*Obrázek 12: Tisk dílu s otvorem za pomoci podpory [29]*

Vhodným umístěním součásti na tiskovou platformu může výrazně snížit množství podpor. To znamená úsporu prášku, energie a času věnovanou apretaci a úpravě povrchu. U jednoduchých tvarů to znamená tisk zcela bez podpor. Viz obrázek č. 13, kde je využíváno tisku bez podpor do úhlu 45° [29].

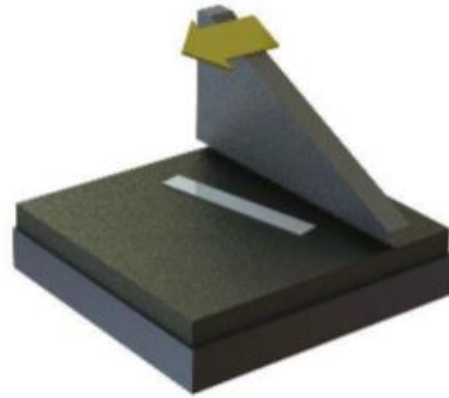


*Obrázek 13: Optimální poloha dílu pro tisk bez podpor [29]*

Poloha součásti vůči platformě ovlivňuje také stavbu jednotlivých vrstev. Například není vhodné hranu součásti umísťovat rovnoběžně s hranou nástroje, který nanáší prášek. Dochází tak k nerovnoměrnému nanesení vrstvy. Lépe je součást pootočit, aby rovná hrana nebyla rovnoběžná, ale svírala s nástrojem úhel alespoň 5° [29].



Obrázek 14: Nevhodná poloha dílu vůči směru nanášení prášku [29]



Obrázek 15: Vhodná poloha dílu vůči směru nanášení prášku [29]

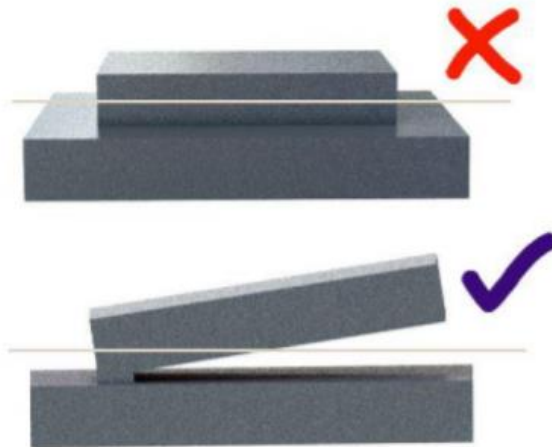
U úzkých a vysokých dílů platí, že poměr mezi výškou a šířkou by neměl být větší jak 8:1. Při překročení poměru hrozí postupné vychylování v horizontálním směru vlivem sil od nanášených vrstev. Pokud tiskneme tenké a vysoké díly na výšku, využíváme plochu základny efektivně, nicméně riziko deformace každého dílu je veliké. Pro eliminaci vychýlení je dobré tyto díly navzájem spojit, ideálně překlenovacím obloukem, jak je znázorněno na obrázku č. 16. Oblouk je pouze podpůrný prvek a po vytisknutí bude odstraněn [29].



Obrázek 16: Tisk vysokých dílů se vzájemným propojením [29]

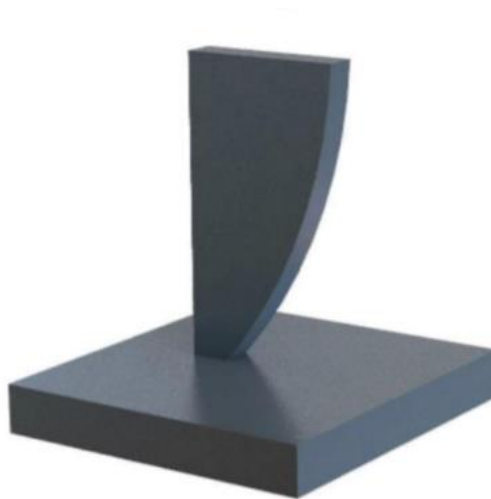
Ačkoliv je DMLS přesná technologie a lze s ní tisknout detaily, je dobré vyvarovat se velice ostrých hran. Je třeba počítat s minimálním rádiusem 0,5 mm.

Dále při polohování dílu do stavebního prostoru je dobré zohlednit, abychom nevytvářeli velké vodorovné řezy. Na velkých plochách se výrazně projevuje deformace způsobená nerovnoměrným natavováním, které zapříčiňuje zbytkové pnutí v dílu. U titanových dílů je tento jev nejvýraznější [29].



*Obrázek 17: Optimální pozice objemnějších dílů snižující zbytkové pnutí [29]*

Ve výsledku se vnitřnímu pnutí u technologie DMLS nikdy nevyhneme. Vysoká teplota paprsku směřujícího do jednoho místa je v tomto případě nesmlouvavá. Náchylnější k vnitřnímu pnutí jsou díly větších rozměrů (přibližně nad 80 mm), neboť zajištění rychlého odvodu tepla je u nich složitější. Nejúčinnějším opatřením je tepelné zpracování, které musí proběhnout bezprostředně po tisku – dříve než odstraníme součást z tiskové platformy. Pokud bude styčná plocha platformy a součásti co nejmenší, omezí se pnutí v oblasti tiskové platformy, a zároveň bude snazší je od sebe oddělit [29].



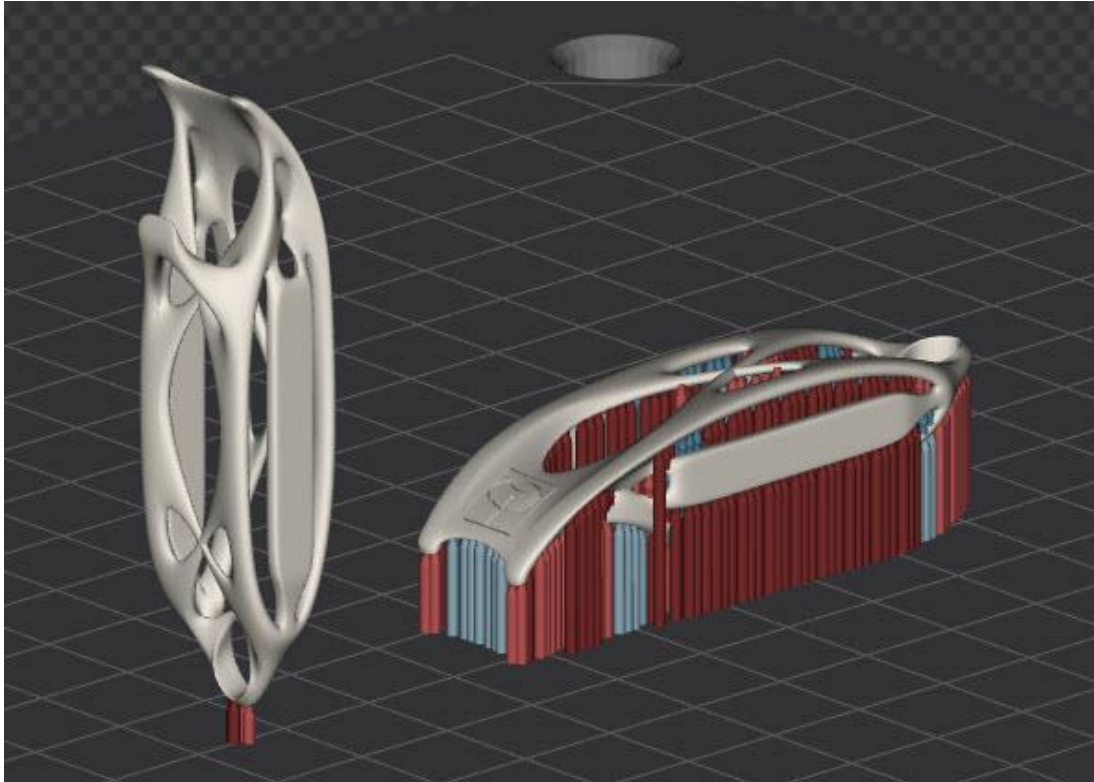
*Obrázek 18: Poloha dílu pro eliminaci pnutí v oblasti platformy [29]*

Ve výsledku je samotná konstrukce dílu a jeho pozicování uměním kompromisu – kompromisu mezi množstvím podpěr, vhodným umístěním a přizpůsobením konstrukce dílu. Podpůrný systém sice brání deformaci při tisku, odvádí teplo a umožňuje vznik složitým tvarům, ale má i své nevýhody. S množstvím podpěr roste spotřeba energie, materiálu a rostou i náklady na jejich odstranění z hůře dostupných míst [29].

### **Topologická optimalizace vnějších tvarů**

Pojem topologická optimalizace označuje snižování hmotnosti dílů s ohledem na okrajové podmínky a vyrobiteľnosť. 3D tisk je vhodná technológia pre tyto optimalizace a výrobu tzv. bionických konstrukcí. Bionická konstrukce je taková konstrukce, která tvarově připomíná biologické struktury. Na pohled se nejedná o ostře řezané technické tvary a za finální podobou stojí náročné výpočty [30].

Výhoda tisku komponent s bionickou konstrukcí spočívá nejen v nižší váze, ale také možnosti tisku s minimem podpor. Podmínkou je vhodné umístění dílu do pracovního prostoru 3D tiskárny. V praxi se bionické konstrukce uplatňují v medicíně. Například u implantátu klíční kosti. Dalším příkladem je automobilový průmysl, který ji využívá pro odlehčené díly závodních vozů [30].



Obrázek 19: Díl s bionickou konstrukcí [30]

### Topologická optimalizace vnitřních tvarů

Jedním z velkých benefitů aditivní technologie využívající natavování práškových kovů je výroba součástí, které tvoří skořepina. Součást je buď zcela dutá, nebo ji zpevňuje nosíková konstrukce. Výplň lze tisknout s různou hustotou nosníků, nebo použít takzvanou kovovou pěnu [30].

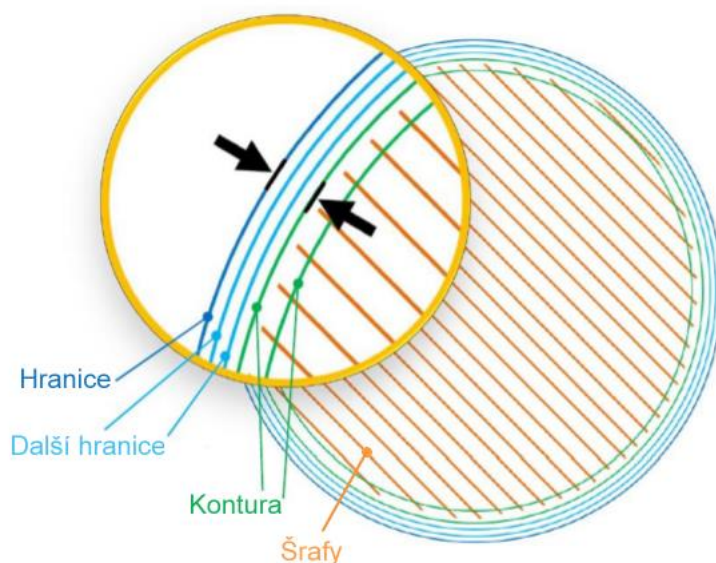


Obrázek 20: Vnitřní nosíkové konstrukce [30]



### 3.1.2. Strategie tisku

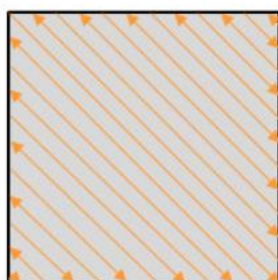
Strategie tisku, též někdy označována jako strategie skenování, nám udává, jakým způsobem budou jednotlivé vrstvy naneseného práškového kovu natavovány. Laser natavuje potřebnou plochu tak, že se pohybuje po přímkové trajektorii tam a zpět. Volbou strategie měníme délku skenovacích vektorů. Delší nepřetržité vektory se tisknou kratší dobu, ale generují větší zbytková napětí. Kromě délky vektorů ovlivňujeme i jejich hustotu s jakou jsou kladeny vedle sebe. Volba strategie tisku je podstatná pro vlastnosti a jakost výsledného dílu. Strategie nám ovlivňuje finální mikrostrukturu, pórovitost a povrch dílu. Skenovací strategii si lze zvolit dle potřeby, nicméně je několik šablon, které se využívají nejčastěji. Každá skenovací strategie je složena z drah, které opisuje laser. Konkrétně to jsou: hranice na okrajích, navazující kontury a samotné šrafy, které vyplňují zbylou plochu [31].



Obrázek 21: Schéma vyplnění plochy šrafy [32]

## Meander

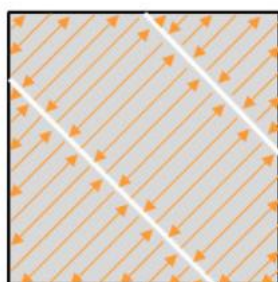
Tato strategie spočívá v tom, že laser šrafuje potřebnou plochu pohybem po přímkové trajektorii od kraje ke kraji. Po vyšrafování jedné plochy se nanese nová vrstva prášku a orientace přímek se pootočí o  $67^\circ$  oproti vrstvě pod ní. Úhel má takovou hodnotu, protože jeho opakováním se výchozí polohy dosáhne až po nanesení 180 vrstev. Strategie Meander je výhodná především díky rychlosti tisku. Nevýhodou je zvýšené zbytkové napětí vnesené do součásti. Proto je tato strategie vhodná pro součásti malého průřezu [31].



Obrázek 22: Princip strategie Meander [33]

## Stripes

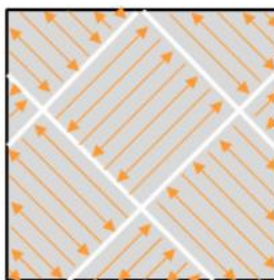
Další možností, jak natavit tenkým paprskem celou plochu je metoda Stripes. Ta spočívá v rozdělení plochy do pruhů a jejich vyplnění jeden po druhém kolmými čarami. Pruhy bývají většinou široké 5 mm. Zbytkové napětí díky takovému rozdělení není veliké, a proto se metoda používá pro tisk dílů s větší plochou průřezu. Doba natavení vrstvy je oproti strategii Meander delší, kvůli množství přejezdů, při kterých laser nepracuje. Pro snížení rizika vzniku pórů, je možné, aby se pruhy překrývaly [31].



Obrázek 23: Princip strategie Stripes [33]

## Chessboard

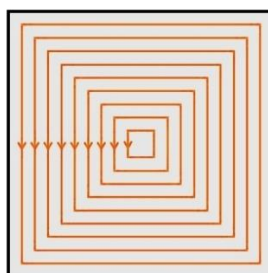
Strategie Chessboard, někdy označována jako Chess, nebo Island, rozdělí plochu do čtverců, které následně laser šrafuje. Šrafy jednotlivých čtverců jsou vzájemně pootočené o 90°. Plocha čtverce většinou bývá 5 mm<sup>2</sup>. Podobně jako u strategie Meander se po natavení jedné vrstvy prášku šablona pootočí o 67°. Zbytkové napětí vnesené do dílu není o moc menší než u strategie Stripes, ale doba skenování je delší. Tudíž se tato metoda nepoužívá tak často [31].



Obrázek 24: Princip strategie Chessboard [33]

## Spiral scanning

Spiral scanning neboli spirálové skenování spočívá v natavování vrstvy od středu ke krajům. Pohyb laseru může být buď po spirále, nebo paprsek vykresluje postupně se zvětšující kontury (viz obrázek č. 25). Výhodou strategie je její jednoduchost a rychlost. Naopak za nevýhodu se považuje, že ve středu vrstvy pracuje paprsek dlouhou dobu na malé ploše. Tudíž ve středové části může dojít k přehřátí. Proto se tato strategie hodí na tisk malých průřezů, kde nebude velký rozdíl v délce trajektorií kontur blíže a dále od středu. Dobrým příkladem je tisk podpor [34].



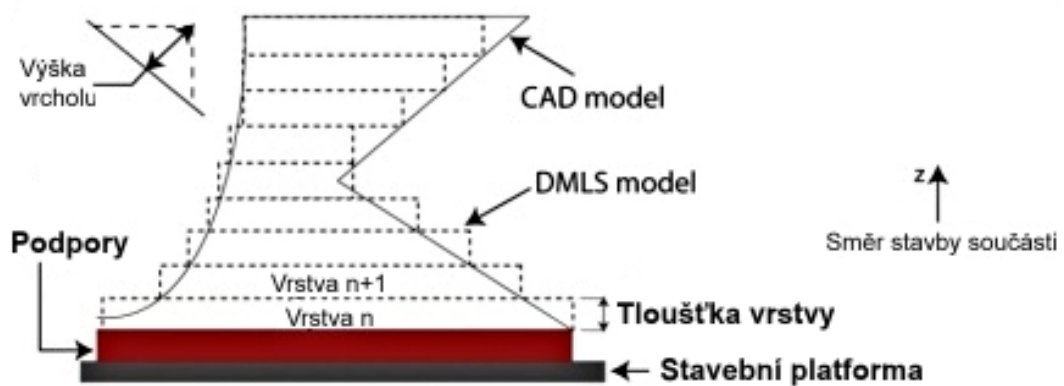
Obrázek 25: Princip strategie Spiral scanning [35]

### 3.1.3. Parametry tisku

#### Tloušťka vrstvy

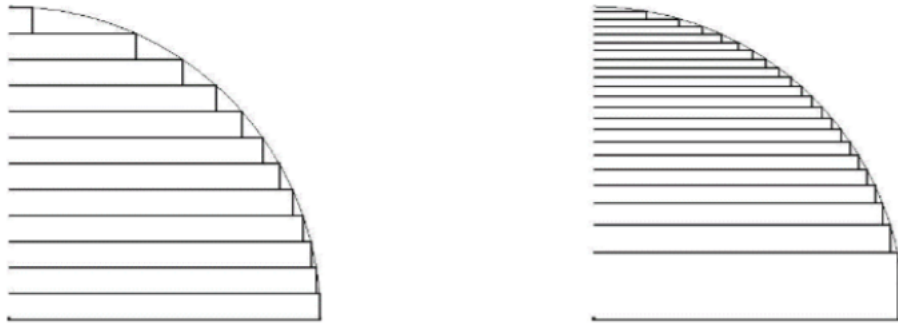
Vrstvu tvoří souvislý povlak prášku o určité tloušťce. Jde o jeden z volitelných parametrů tisku, kde minimální tloušťka je dána hrubostí kovového prášku, nebo technologií jeho nanesení. Maximální tloušťka je dána požadavky na kvalitu tisku a výkonem laseru. Obvykle bývá mocnost vrstvy v rozmezí 20 až 50  $\mu\text{m}$  [31].

Tento parametr ovlivňuje výrobní čas, rozměrovou přesnost a kvalitu výsledného povrchu. Co se týče kvality povrchu, ten je znát především na šikmých nebo zaoblených plochách. Projevuje se zde schodištvý efekt [36].



Obrázek 26: Vliv tloušťky vrstev na tvar dílu [36]

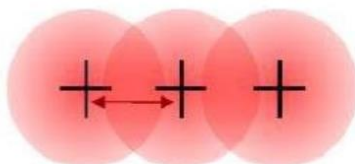
Tvar takzvaných schodů je závislý na úhlu stoupání hrany. Pokud optimalizujeme proces tisku tak, že tloušťka vrstvy se bude měnit v závislosti na tvarovaném okraji dílu, docílíme tak lepší kvality povrchu. Daní za lepší povrch ve zkosených a oblých částech bude delší doba tisku [36].



Obrázek 27: Optimalizace tloušťky jednotlivých vrstev [37]

### Vzdálenost bodů

Za body jsou považována místa, která natavil laser. Paprsek laseru není nepřetržitý, nýbrž složený z jednotlivých impulzů. Při pohybu paprsku vznikají mezi natavenými body vzdálenosti, které mají vliv na soudržnost materiálu a porozitu. Ideální vzdálenost je udávána jako  $2/3$  průměru přímo natavené oblasti – takzvaný "melt pool". Dojde tak k  $1/3$  překryvu a eliminuje se vznik pórů. Energie laserového paprsku musí být dostatečně velká, aby došlo ke spojení se spodní vrstvou a nedocházelo k delaminaci [31].



Vzdálenost bodů

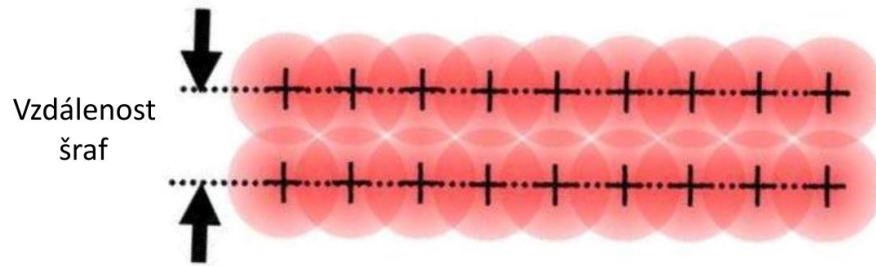
Obrázek 28: Vzdálenost míst natavených laserem [32]



Obrázek 29: Melt pool [32]

### Vzdálenost šraf

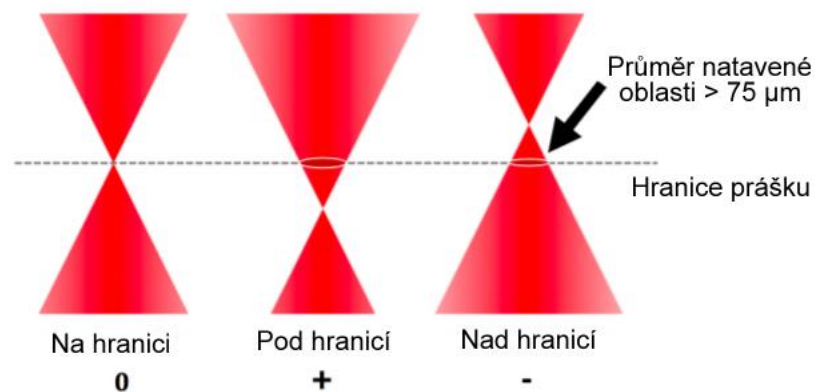
Body tvoří trajektorie jednotlivých šraf a ty vyplňují definovanou plochu. Vzdálenost šraf, podobně jako u bodů, ovlivňuje mechanické vlastnosti, soudržnost a porozitu. Ideální vzdálenost šraf jsou  $2/3$  jejich tloušťky. Dojde tak k pevnému spojení a minimální porozitě [31].



Obrázek 30: Schéma natavených bodů tvořící šrafy [32]

### Výkon paprsku

K natavení prášku je potřeba dostatečně výkonný laser. V DMLS tiskárnách se používá paprsek o maximálním výkonu 400 W. Tento výkon se soustředí do co nejmenšího bodu, ohniska. Pokud je ohnisko přesně na horní hranici nanesené vrstvy, dosahujeme nejmenšího průměru natavované oblasti. Taková oblast má průměr 66 až 75  $\mu\text{m}$  a umožňuje přesné cílení paprsku s rychlým tavením prášku. Ohnisko lze posouvat nad i pod horní hranici prášku a tím regulovat velikost natavované oblasti [31].

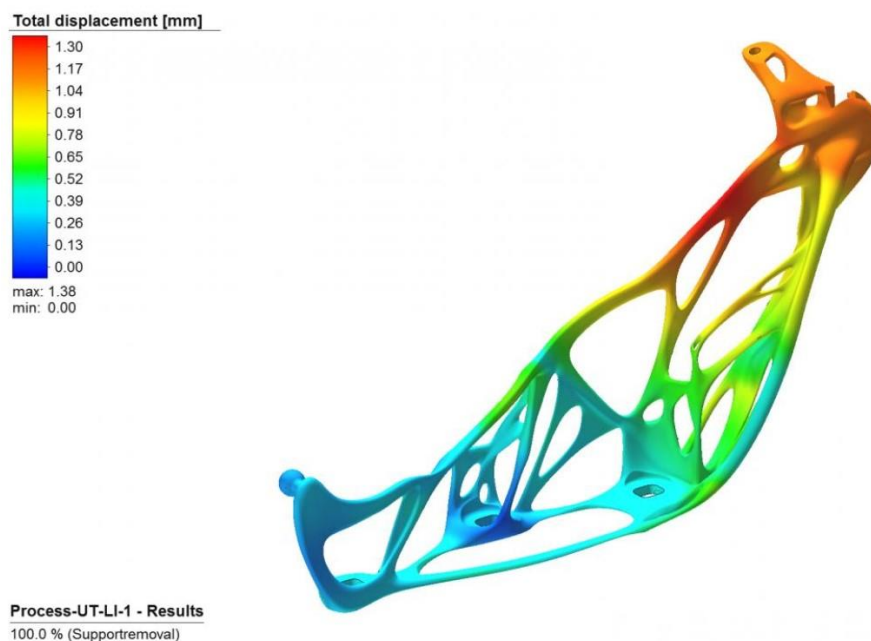


Obrázek 31: Vliv pozice ohniska paprsku na velikost natavované oblasti [31]

## 4. Optimalizace za pomoci simulace

S rostoucím uplatněním aditivních technologií roste i použití různých softwarů, které jsou s aditivní výrobou spojeny. Jedná se o programy určené k navrhování samotných dílů, programy k obsluze tiskáren, simulační programy a v neposlední řadě i o programy zajišťující bezpečný přenos dat. Konstruování součástí za pomoci CAD programů je naprosto běžná věc napříč průmyslem. Podobně nepostradatelnou věcí se stávají simulace u aditivní výroby [38].

Obecně se dá simulace definovat jako napodobování chodu reálných procesů nebo systémů v průběhu času. Simulace zahrnuje generování umělé historie, přičemž pozorování takové historie slouží k vyvození závěrů. Takto vyvozené závěry plně respektují charakteristiky reálného systému, který simulace představuje. Simulace je stále častěji používanou metodou pro řešení problémů skutečného světa. V případě 3D tisku kovových dílů si našla uplatnění jak při navrhování dílu, tak při procesu tisku samotného. Za pomoci simulace získáme poměrně přesnou představu o deformacích dílu, zbytkových napětích a jiných vadách ještě než začneme skutečně tisknout. Data získaná simulací umožňují včas upravit konstrukci, počet nebo umístění podpěr a tiskové parametry. Tisk jednoho kovového dílu je poměrně nákladný proces oproti konvenčním technologiím, tudíž je snaha tisknout s minimální chybovostí. U aditivních technologií je navíc velké množství tiskových parametrů a proměnných, které je bez znalosti určitých dat obtížné určit. Provést simulaci a porovnat progres při změně jednotlivých parametrů nebo různých materiálových variací je časově i ekonomicky výhodnější. Simulace je vlastně nástroj k pochopení a kvantifikaci variability. Software kromě parametrů tisku, pomáhá i při pozicování dílu vůči tiskové platformě [38, 39].



Obrázek 32: Tvarová přesnost topologicky optimalizovaného pantu kapoty automobilu [40]

Jednou ze společností zabývajících se vývojem simulačního softwaru je společnost Ansys. Ansys razí myšlenku, že schopnost vytištění kvalitního dílu stojí na třech pilířích: návrh dílu, obsluha stroje, specializace výroby. A této myšlence pořizuje i nabídku softwarů [38].

- **Návrh dílu**

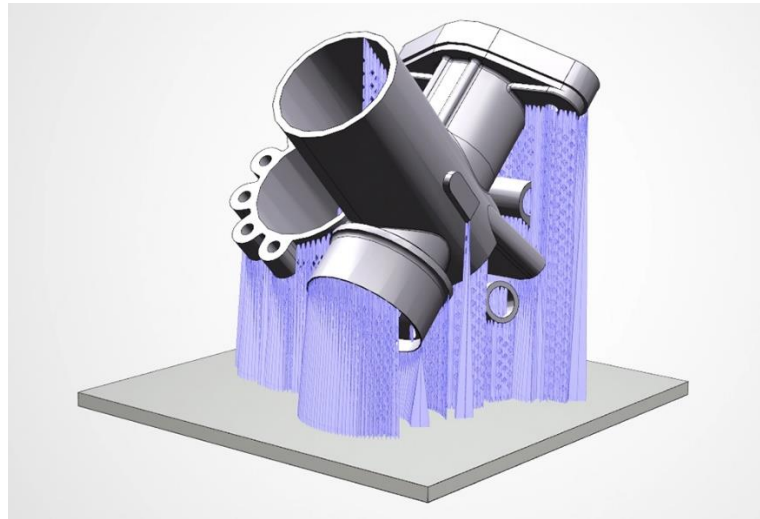
Při navrhování dílu vyráběného aditivní technologií se konstrukce dílu může lišit od dílů vyráběných jinými technologiemi. Odlišnost přináší řadu výhod, které je dobré při konstrukci využít. Příkladem je možnost tisknout tvarově velice složité díly. Tvarově složitější a členitější díly si naopak žádají sofistikovanější síť podpor. S návrhem proto konstruktérům pomáhají programy Ansys Workbench Additive a Ansys Additive Prep. Druhý zmíněný software umí, mimo jiné, síť podpor vygenerovat [38].

- **Obsluha stroje**

Další software z nabídky společnosti Ansys je Ansys Additive Print – ten je určený pro operátora stroje. Program umožňuje obsluze upravovat soubor (obvykle ve



formátu STL). Cílem je minimalizovat deformace a zbytkové napětí, zkrátit dobu tisku, případně optimalizovat množství podpor [38].



Obrázek 33: Automatické generování podpor [41]

- **Specializace výroby**

Software určený pro specialisty výroby, případně pro materiálové specialisty je třetím pilířem pro snazší zhotovení součástí. Nazývá se Ansys Additive Science. Umožňuje volit strategii tisku, optimalizovat parametry tisku, včetně výkonu a rychlosti laseru. Cílem je dosáhnout požadované kvality dílu. Data, se kterými software pracuje, byla sbírána tiskem jednotlivých testovacích součástí. Součásti byly tisknuty z různých materiálů a s různými parametry. Množství vzájemných kombinací parametrů je obrovské a dává simulačnímu softwaru „znalosti“, které aplikuje právě specialista výroby [38].

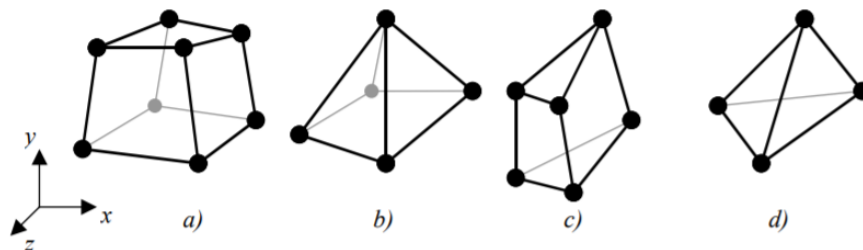
#### **4.1.1. Metoda konečných prvků (MKP)**

Numerické simulace se v průmyslu objevují stále častěji a nemusí jít nutně o aditivní technologie nebo konstrukci. Jednou z metod, kterou simulační softwary využívají je metoda konečných prvků (MKP, anglicky FEM – Finite Element Method) [42].

Podstatou MKP je rozložení modelu součásti (diskretizaci spojitého systému) na prvky konečných rozměrů, které jsou navzájem spojeny jedním, nebo více uzlovými body.

Rozložením se získají algebraické rovnice pro posunutí každého bodu ve všech směrech. Z těchto rovnic se dále určuje napětí a deformace v každém z bodů. Ve výsledku bude model součásti popsán za pomoci velkého systému rovnic. S počtem uzlových bodů roste přesnost popisu součásti a zároveň se zvyšují nároky na hardware i doba výpočtu [42].

Jednotlivé prvky lze rozdělit na 3D prvky (viz obrázek č. 34 a), b), c)) a 2D prvky (viz obrázek č. 34 d)). Kromě dimenze a tvaru je pro prvek charakteristický počet a poloha uzlových bodů [42].



Obrázek 34: Prvky s různým počtem uzlových bodů [43]

Metoda nachází uplatnění při řešení problémů pružnosti, dynamiky, proudění kapalin, plynů, vedení tepla a v mnoha dalších případech. V oblasti konstrukce se pomocí MKP kontrolují již navržené díly, nebo se určují nejvíce namáhaná místa konstrukce. Softwarů postavených na MKP je velké množství. Mezi nejznámější se řadí produkty firmy Ansys, Altair, Dassault Systèmes nebo Simufact [42].

## 4.2. Simulační software

### 4.2.1. Ansys Additive

Ansys Additive je simulační software, jenž napomáhá při navrhování dílů, které jsou tisknuty vrstvou po vrstvě. Jako nástroj slouží hlavně konstruktérům a procesním inženýrům. Při simulaci počítá i s postupným natavováním a tuhnutím prášku, díky čemuž je schopný zobrazit pnutí v součásti. Dále je Additive schopný vypočítat rozměrovou přesnost součásti, spolehlivost procesu při odstranění podpor a požadovanou strukturu materiálu [43].

Podpůrné struktury jsou generovány automaticky. Za tímto účelem se geometrie výsledné součásti nahrává ve formátu STL. Není to však podmínkou a konstruktér si může ručně navrhnout vlastní systém podpor. Po nahrání dat je součást automaticky rastrována a zobrazena ve formě voxelů, jejich velikost lze upravit a měnit podle potřebného rozlišení. Materiál součásti se volí z knihovny a jeho materiálové charakteristiky je možné dodatečně upravit [43].

Ansys Additive poskytuje informace o deformaci dílu na základě tří typů simulací:

- **Předpokládané napětí**

Jedná se o lineární metodu, která vyhodnocuje konstantní napětí v každém voxelu na základě geometrie součásti. Tato metoda nebere v potaz tiskovou strategii. Je tak méně přesná, ale výpočet je velice rychlý [43].

- **Skenovací vzor**

Analýza Skenovací vzor uvažuje tiskovou strategii a díky tomu odvozuje směrové napětí pro každou vrstvu. Informace o trase laserového paprsku musí být dodány spolu s geometrií dílu, nebo mohou být vygenerovány za pomoci generátoru skenovacích vzorů [43].

- **Tepelné namáhání**

Tato metoda provádí tepelně-mechanickou analýzu. Do úvahy bere jednotlivé skenovací vektory, počítá s účinky zahřívání i chlazení materiálu a umožňuje vizualizovat tepelnou historii. Jedná se o nejpřesnější analýzu, co Ansys Additive nabízí, ale vyžaduje nejvíce vstupních dat a je výpočetně nejnáročnější [43].

Na základě těchto analýz je možné určit deformace součásti na stavební platformě, popřípadě po jejím oddělení z platformy. Dále jsou k dispozici výsledky namáhání pro posouzení rizika zlomení podpory nebo zobrazení částí s rozdílnou hustotou [43].

#### 4.2.2. Simufact Additive

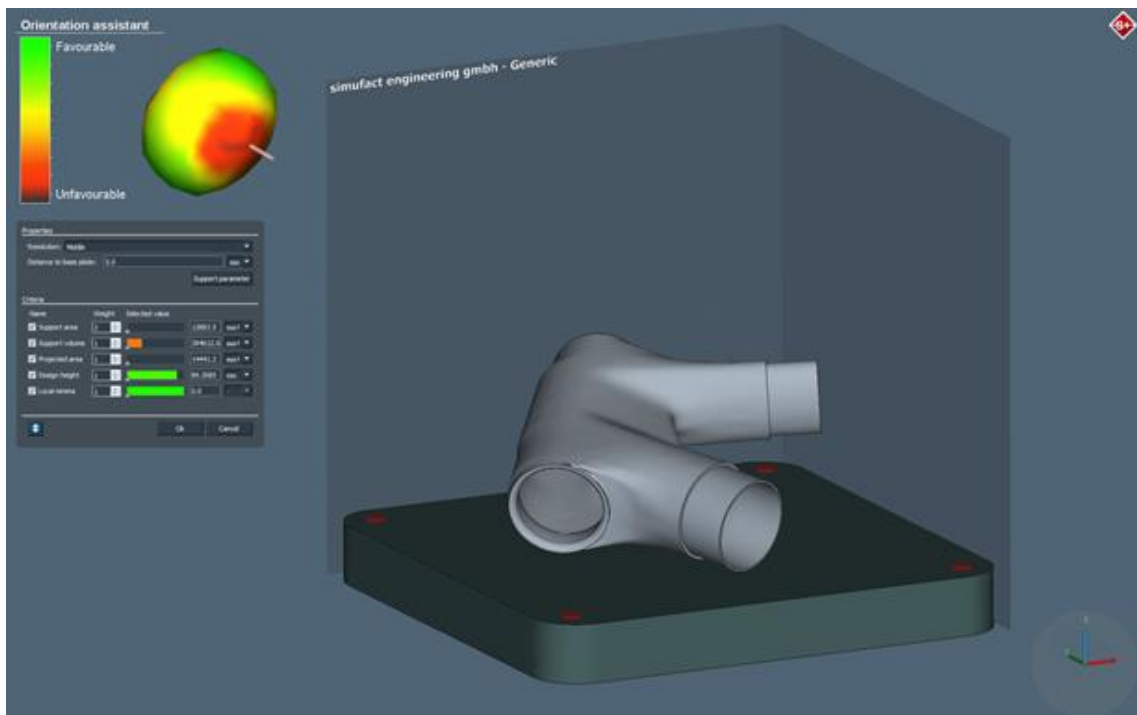
Simufact Additive je software vyvíjený společností Simufact, která spadá pod MSC Software. Software obsahuje sadu nástrojů pro analýzu procesu aditivní výroby kovových dílů a případného tepelného zpracování. Podporované technologie jsou SLM a DMLS. Největším přínosem pro uživatele je nalezení nejvhodnější polohy dílu na platformě, automatická generace systému podpor a predikce možných výrobních vad. Simufact Additive se snaží ulehčit práci za pomoci automatizace a funkce asistenta. Asistent pomáhá při samotné práci s programem a dokáže provést uživatele pracovními postupy jako například [44, 45]:

- Automatická kompenzace zkreslení součásti

Tato funkce dokáže detekovat zkreslení součásti a automaticky snižovat jeho hodnoty, dokud nejsou splněny požadované geometrické tolerance [45].

- Automatická optimalizace podpor a umístění součásti

Podpory ovlivňují efektivitu celého procesu tisku. Proto Simufact Additive obsahuje optimalizační funkci, která automaticky určuje optimální nastavení pro tisk podpurných struktur. Asistent pro umístění dílu na tiskovou platformu zase pomůže při volbě polohy [45].



Obrázek 35: Prostředí programu Simufact Additive – asistent pro umístění dílu na platformu [46]

Výstupy v podobě dat a vizualizací jsou podobné jako u jiných softwarů, které jsou zaměřeny na simulace aditivní výroby. Simufact Additive umožňuje simulovat proces stavby, předvídat chování materiálu s přihlédnutím k deformacím vyvolaných tepelným pnutím a analyzovat výsledný díl, třeba z pohledu pevnosti nosné konstrukce [45].

#### 4.2.3. Altair Inspire Print3D

Jedná se o software od společnosti Altair určený pro simulaci aditivní výroby. Altair se specializuje na optimalizační technologie pro všechny druhy výrobních metod – ať už jde o tváření plechů, lití nebo vstřikování. Rychle se rozvíjející odvětví aditivní výroby si žádalo vytvoření speciálního softwaru. Podobně jako programy od jiných společností slouží Inspire Print3D pro optimalizaci tiskových parametrů a zefektivnění tisku [47, 48].

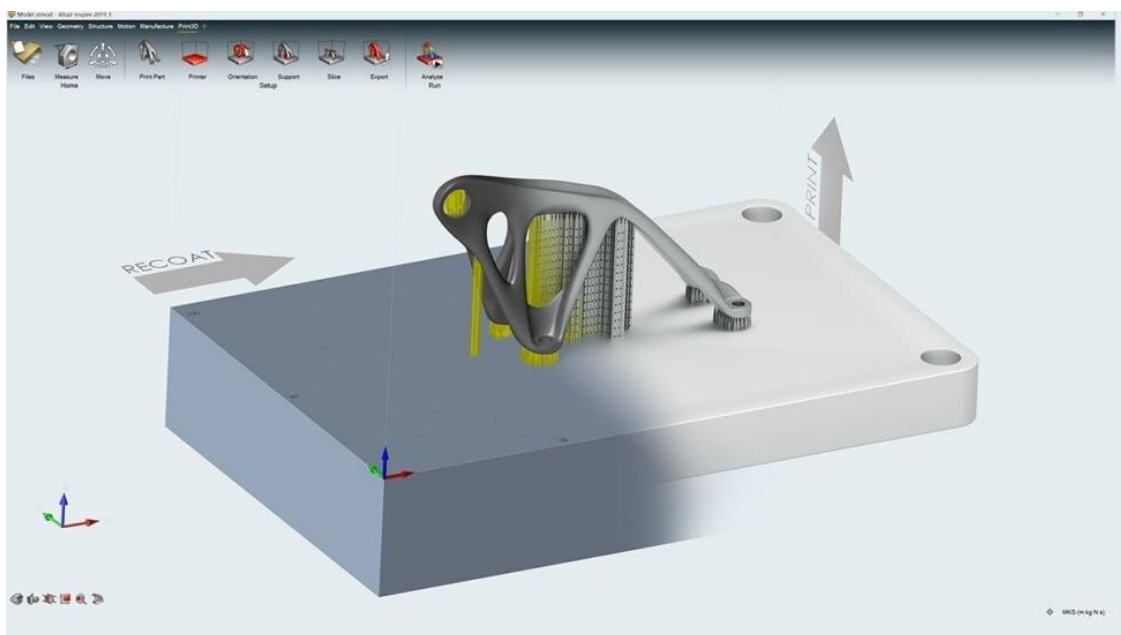
Inspire Print3D se zaměřuje na dvě věci:

- V rámci platformy Inspire3D je uživateli umožněno vytvářet návrhy pro jakoukoliv technologii z aditivních technologií. Proces se řídí určitými pravidly,

kteřá zaručují, že návrh bude možné zhotovit aditivní technologií. Mimo jiné dokáže program optimalizovat model tak, aby byly podpůrné struktury minimální, nebo dokonce žádné – pokud si tak uživatel zvolí. V tom případě dojde ke značné úspoře materiálu a energie [48].

- Druhé zaměření je na automatické generování návrhu na základě požadavků uživatele. Takto lze generovat návrhy pro Selective Lasere Melting (SLM), Fused Deposition Modeling (FDM) nebo Binder Jetting [48].

Společnost Altair u jejich simulačního softwaru zaměřeného na kovový 3D tisk vyzdvihuje možnost vytvořit návrh a následně ho podrobit simulaci v jenom programu s přehledným grafickým prostředím. Není potřeba sada programů na návrh dílu, přidání podpor a termomechanickou simulaci k vyhodnocení vad a deformací. Vše je obsaženo v prostředí Inspire Print3D [47, 48].



Obrázek 36: Prostředí programu Altair Inspire Print3D [47]

#### **4.2.4. Dassault Systèmes Simulia**

Simulia je komplexní softwarové řešení od společnosti Dassault Systèmes pro různé optimalizace za pomoci numerických simulací. Užší část balíčku Simulia nazývaná 3D Experience je zaměřena na aditivní výrobu a dokáže predikovat zkreslení součásti, zbytkové napětí a změny v mikrostruktuře kovových a kompozitních materiálů. Simulací mikrostruktury lze předejít vadám, které v materiálu mohou vznikat během tisku, případně vybrat zcela jiný materiál na základě získaných informací. 3D Experience také počítá s tepelně-mechanickým namáháním součásti a dokáže zobrazit zbytkové napětí v součásti i po jejím oddělení z tiskové platformy. Software podporuje tiskové technologie: SLM, DMLS, SLS, FDM [44, 49].

## 5. Praktická část

### 5.1. Úvod do problematiky

Při procesu 3D tisku kovových dílu, kde se natavuje kovový prášek pomocí laseru, dochází k řadě fyzikálních jevů způsobených lokálním ohřevem. To, jakým způsobem tento proces probíhá, má zásadní vliv na mechanické vlastnosti a tvarovou přesnost dílu. Pro dosažení kvalitního výtisku je zapotřebí dobře kombinovat velké množství procesních parametrů. Parametry lze rozdělit do několika skupin. Většinou se začíná volbou konstrukce dílu, která musí splňovat určitá kritéria. Neméně důležitá je volba materiálu, kvalita prášku a volba polohy, ve které se bude díl tisknout. Tou nejvíce variabilní částí jsou tiskové parametry, kde se volí strategie, nastavuje se výkon laseru, jeho rychlost, ohnisko a mnoho dalších parametrů. Právě laser vnáší veliké množství tepla do jednoho bodu a záleží na tepelné vodivosti okolního materiálu, jak moc bude teplo odvádět. Důsledkem tepelného gradientu může dojít k deformaci výsledného dílu.

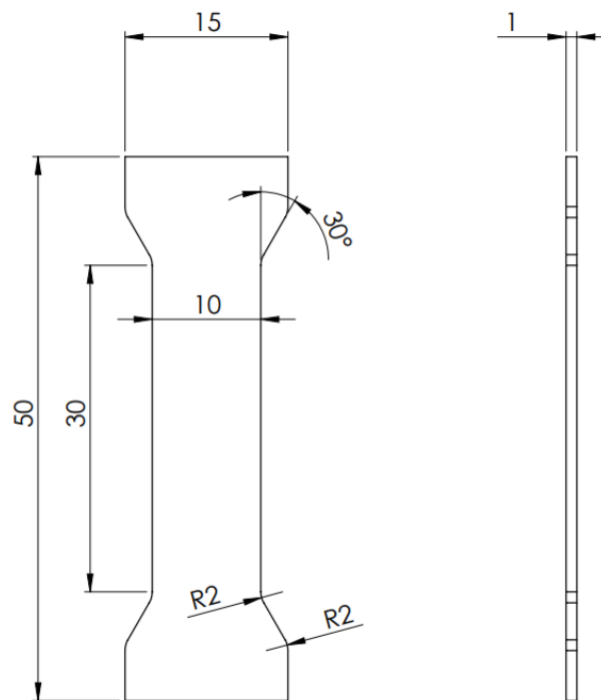
Tisk tenkostěnných konstrukcí je specifický. Procesní parametry určené na stavbu objemových dílů nemusejí být vhodné pro díly tenkostěnné. Pro tenkostěnné díly se volí jiný způsob výroby kvůli rozdílné geometrii dílu. Velký rozdíl je v distribuci tepla tenkými stěnami a ve velikosti plochy průřezu. Pro vyplnění plochy tenkého průřezu není vhodný každý skenovací vzor. Ne všechny kombinace procesních parametrů musí nutně způsobit deformaci dílu, ale každá kombinace bude mít jiné mechanické vlastnosti.

### 5.2. Návrh vzorku

Zkušební těleso je navrženo tak, aby rozměry výšky a šířky značně převyšovaly tloušťku. Tudiž jde o tenkostěnný díl. Výška samotného vzorku je 50 mm, ale počítá se s 2,4 mm navýšením kvůli systému podpor pro minimalizaci tepelného ovlivnění a spolehlivé oddělení výsledných vzorků od tiskové platformy. Rozměry samotné byly voleny tak, aby vzorek odpovídal představám o tenkostěnné konstrukci a zároveň bylo ekonomicky přijatelné tisknout 24 kusů. Tvar vzorku je navrženo podobně jako běžné zkušební těleso



pro zkoušku tahem. Konce jsou rozšířeny o 5 mm oproti středové části kvůli jistému uchycení vzorku mezi čelisti zkušebního stroje. Jelikož vzorky byly tisknuty na výšku, muselo být splněno pravidlo, že úhel, pod kterým se budou konce rozšiřovat nepřesáhne 45°. Jinak by musely být použity podpůrné struktury.



Obrázek 37: Rozměry CAD modelu zkušebního tělesa

Všechny vzorky byly vytisknuty z austenitické korozivzdorné oceli s nízkým obsahem uhlíku, která se značí AISI 316L (EN 1.4404, X2CrNiMo17-12-2). Materiál AISI 316L je pro tisk vhodný, mimo jiné, díky své dobré tepelné vodivosti. Chemické složení materiálu je uvedeno v tabulce:

Tabulka 1: Chemické složení AISI 316L [%] [50]

Cr	Ni	Mo	Mn	Si ≤	N ≤	O ≤	P ≤	C ≤	S ≤
16-18	10-14	2-3	2	1	0,1	0,1	0,045	0,03	0,03

Tabulka 2: Charakteristiky materiálu AISI 316L dle katalogového listu Renishaw [50]

Veličiny	Hodnoty
Hustota	7,99 g/cm <sup>3</sup>
Tepelná vodivost	16,2 W/mK
Rozsah teploty tání	od 1371 °C do 1399 °C
Mez pevnosti v tahu $R_m$ (horizontální směr XY)	676 MPa ± 2 MPa
Mez pevnosti v tahu $R_m$ (vertikální směr Z)	624 MPa ± 17 MPa
Mez kluzu v tahu $R_e$ (horizontální směr XY)	547 MPa ± 3 MPa
Mez kluzu v tahu $R_e$ (vertikální směr Z)	494 MPa ± 14 MPa
Tažnost $A$ (horizontální směr XY)	43 % ± 2 %
Tažnost $A$ (vertikální směr Z)	35 % ± 8 %
Modul pružnosti $E$ (horizontální směr XY)	197 GPa ± 4 GPa
Modul pružnosti $E$ (vertikální směr Z)	190 GPa ± 10 GPa
Tvrdoost – Vickers $HV$ (horizontální směr XY)	198 HV0,5 ± 8 HV0,5
Tvrdoost – Vickers $HV$ (vertikální směr Z)	208 HV0,5 ± 6 HV0,5
Drsnost povrchu – parametr $Ra$ (horizontální směr XY)	od 4 μm do 6 μm
Drsnost povrchu – parametr $Ra$ (vertikální směr Z)	od 4 μm do 6 μm

### 5.3. Tisk vzorků

#### 5.3.1. Tiskové parametry

Vzorky byly rozděleny do čtyř sad po šesti kusech, podle tiskových parametrů. Pro rozpoznání jednotlivých sad vzorků, byl každý kus opatřen značkou a následně popsán písmeny A až D. Skupina A byla vytisknutá optimalizovanou strategií Chess. V případě skupiny B byl kovový prášek spékán strategií Meander. Sada C vznikla pomocí strategie Stripes a sada D pomocí Chess. Každá z tiskových strategií má určité výhody a určuje mechanické vlastnosti výsledného dílu. Tyto vlastnosti lze dále upravovat jednotlivými tiskovými parametry každé strategie.

Tabulka 3: Parametry tisku (1)

	<b>Chess opt. (A)</b>	<b>Meander (B)</b>	<b>Stripes (C)</b>	<b>Chess (D)</b>
<b>Hranice</b>				
Kompenzace paprsku [mm]	0,025	0,025	0,025	0,025
Počet hranic	2	2	2	2
Úplné vyplnění	Ne	Ne	Ne	Ne
Vzdálenost hranic [mm]	0,1	0,1	0,1	0,1
Stav	Naruby	Naruby	Naruby	Naruby
<b>Cesty bloku</b>				
Povolit cestu bloku	Ano	Ano	Ano	Ano
Práh úhlu pro rohy [°]	60	60	60	60
Faktor korekce	1,2	1,2	1,2	1,2
<b>Vyplňující kontury</b>				
Povolit vyplňující kontury	Ne	Ne	Ne	Ne
<b>Šrafy</b>				
Povolit šrafy	Ano	Ano	Ano	Ano
Vzdálenost šraf [mm]	0,1	0,095	0,11	0,11
Kompenzace šraf [mm]	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
Filtr délek [mm]	0,01	0,01	0,01	0,01
Optimalizace třídění	Ne	Ne	Ne	Ne
<b>Rotace</b>				
Úhel natočení (poč. hodnota) [°]	0	0	0	0
Úhel natočení (přírůst. hodnota) [°]	67	67	67	67
<b>Vzor</b>				
Typ výplně	Chess	Meander	Sripes	Chess
Stripe parametry (pouze Stripes)				
Velikost [mm]	-	-	5	-
Stripe kompenzace [mm]	-	-	0	-
Limit opakování	-	-	10	-
Sloučení vektorů	-	-	Ano	-
Optimalizace skoků	-	-	Ano	-

Tabulka 4: Parametry tisku (2)

	<b>Chess opt. (A)</b>	<b>Meander (B)</b>	<b>Stripes (C)</b>	<b>Chess (D)</b>
<b>Šrafovaní (jádro)</b>				
Povolit šrafovaní	Ne	Ne	Ne	Ne
<b>Hranice</b>				
Výkon [Watt]	110	110	110	110
Čas expozice [ $\mu$ s]	100	100	100	100
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	20	20	20	20
Ohnisko [mm]	0	0	0	0
<b>Hranice bloku</b>				
Výkon [Watt]	110	110	110	110
Čas expozice [ $\mu$ s]	100	100	100	100
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	20	20	20	20
Ohnisko [mm]	0	0	0	0
<b>Dodatečné hranice</b>				
Výkon [Watt]	200	200	200	200
Čas expozice [ $\mu$ s]	90	90	90	90
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	40	40	40	40
Ohnisko [mm]	0	0	0	0
<b>Dodatečné hranice bloku</b>				
Výkon [Watt]	200	200	200	200
Čas expozice [ $\mu$ s]	90	90	90	90
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	40	40	40	40
Ohnisko [mm]	0	0	0	0
<b>Kontury výplně</b>				
Výkon [Watt]	0	0	0	0
Čas expozice [ $\mu$ s]	50	50	50	50
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	75	75	75	75
Ohnisko [mm]	0	0	0	0
<b>Šrafy</b>				
Výkon [Watt]	200	200	200	200
Čas expozice [ $\mu$ s]	80	80	80	80
Vzdálenost bodů [ $\mu$ m]	55	45	60	60
Ohnisko [mm]	0	0	0	0

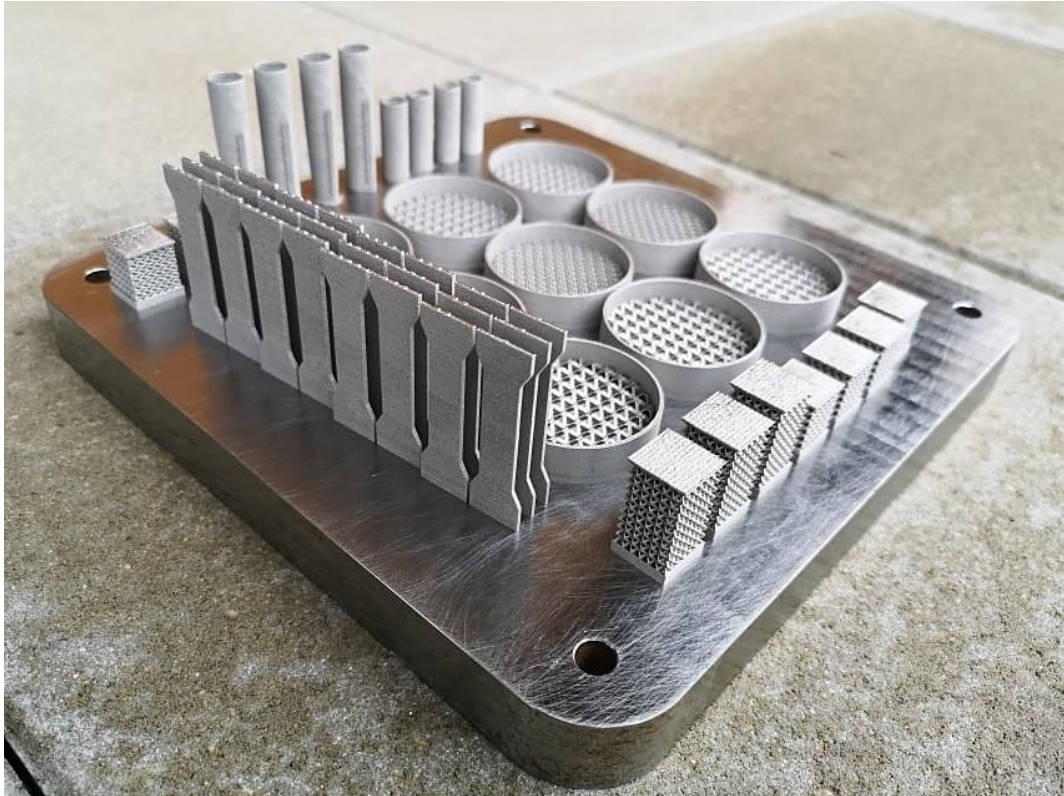
Tiskové parametry uvedené v tabulkách č. 1 a 2 byly nastaveny v softwaru tiskárny. Vedle těchto hodnot jsou parametry, které byly stejné pro každou tiskovou strategii. Jedná se o tloušťku vrstvy naneseného práškového kovu a průměr paprsku, který prášek spéká. Výška vrstvy byla 50  $\mu$ m a průměr paprsku 70  $\mu$ m. Všechny vzorky byly tištěny najednou. Navíc se v tiskárně tiskly i jiné díly, tudíž lze dobu tisku pouze odhadnout. Tisk

jednoho vzorku trval přibližně 13 minut, přičemž rozdíl mezi jednotlivými strategiemi u tak malých dílů je zanedbatelný.

### **5.3.2. Poloha součásti**

Všechny vzorky byly tisknuty na výšku. Ačkoli z pravidel technologičnosti konstrukce plyne, že tenké a vysoké díly by neměly přesáhnout poměr výšky a šířky 8:1. Pokud bude poměr větší, hrozí postupné vychylování v horizontálním směru. Účinnou obranou proti vychýlení je vzájemné propojení vysokých dílů. Eliminace vychýlení propojením nebyla záměrně použita právě proto, aby se ukázaly deformace při tisku jednotlivými strategiemi. Ve výsledku nebyla ani jedna tisková strategie s navrženými parametry vyhodnocena jako nevyhovující z důvodu deformací při tisku. Jednak se jednalo o poměrně osvědčené tiskové parametry a za druhé, poměr výšky a šířky nebyl nijak extrémní.

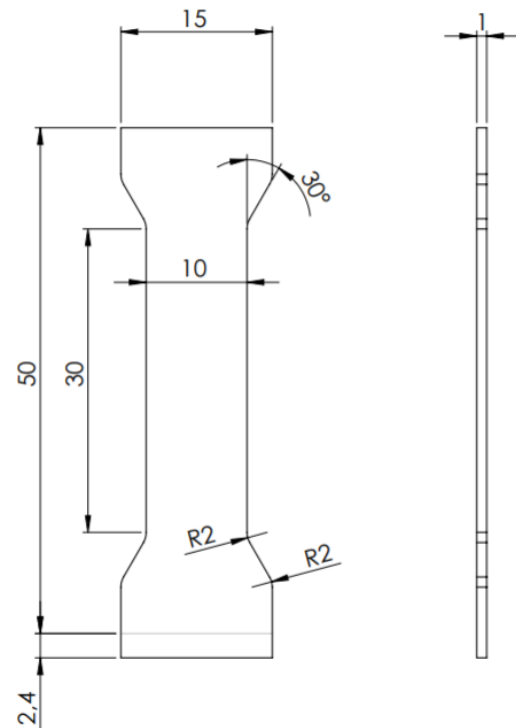
K udržení vzorků ve svislé poloze přispěla i pozice, při níž hrany tisknutých dílů nejsou rovnoběžné s hranami tiskové platformy. Břit nástroje nanášející vrstvu prášku se pohybuje mezi konci platformy a pokud by narazil na kolmou hranu dílu, mohlo by dojít k nerovnoměrnému nanesení prášku a postupnému vychylování celého dílu.



Obrázek 38: Tisková platforma s hotovými díly

Vytisknutý díl byl oproti návrhu vyšší. K navýšení na spodní straně o 2,4 mm došlo kvůli podporám, které byly následně odříznuty. Předělo se tak případnému poškození vzorku při jeho oddělování z tiskové platformy.

Na stejné tiskárně (Renishaw AM250) strategií Chess byly tisknuty i vzorky, které pro svůj výzkum použila Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity. Její výzkum se zabíral vlivem polohy dílu vůči tiskové platformě na mechanických vlastnostech. Z výsledků výzkumu je patrné, že nejlepších mechanických



Obrázek 39: Rozměry CAD modelu zkušebního tělesa s podporami

vlastností dosahuje tenkostěnný díl, pokud je tisknutý naplocho a hrany jsou rovnoběžné s hranami tiskové platformy [51].

Nicméně, ne vždy je možné tisknout tenkostěnný díl, nebo součást s tenkostěnnými segmenty v ideální poloze. I proto byla pro účely této práce zvolena extrémnější poloha. Poloha na výšku.

### 5.3.3. Výrobní zařízení – Renishaw AM250

Vzorky byly tisknuty na zařízení od společnosti Renishaw s označením AM250. Tiskárna natahuje kovový prášek za pomoci výkonného vláknového laseru a je schopná spékat vrstvy o tloušťce 0,02-0,1 mm. Kontakt prášku s okolní atmosférou se snaží zabránit filtrační systém tiskárny, který udržuje nízkou hladinu kyslíku v pracovním prostoru a chrání obsluhu tiskárny před vdechováním prášku. Filtrační systém z pracovní komory odčerpává vzduch, který je nahrazen ochranným plynem [52].



Obrázek 40: Tiskárna Renishaw AM250 [52]

Veliká přednost modelu AM250 je možnost rychle měnit materiály, ze kterých se součást tiskne. Tisknout lze z korozi-vzdorné oceli AISI 316L (EN 1.4404, X2CrNiMo17-12-2), slitiny hliníku AlSi10Mg, slitiny titanu Ti-6Al-4V a dalších materiálů. Zásobník práškového kovu díky speciálním ventilům umožňuje doplňovat prášek i v průběhu tisku. Dalším benefitem tohoto modelu tiskárny jsou nízké provozní náklady. Tyto se šetří díky nízké spotřebě ochranného plynu, cenově dostupným filtrům a trvanlivým čepelím, které nanáší jednotlivé vrstvy prášku [52].

Renishaw AM250 disponuje stavební platformou o rozměrech 250x250 mm, na níž lze tisknout až do výšky 360 mm. Tiskárna je schopná soustředit parsek do bodu průměru 70  $\mu\text{m}$ . Laser má výkon 200 W nebo 400 W a prášek natavuje ve vakuové komoře, kde je koncentrace kyslíku pod 50 ppm. Takto nízká koncentrace kyslíku v kombinaci s ochrannou atmosférou zajišťuje stálost hliníkových a titanových slitin [52].

## 5.4. Zkouška tahem

Tahová zkouška je nejčastěji používanou statickou zkouškou, která slouží k hodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Zkouška spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče až do jejího přetržení. Rozměry a tvar zkušebních těles jsou dány rozměry výrobků, ze kterých jsou odebírány. Mohou být obrobena i neobrobena, ale jejich povrch musí být celistvý, bez vrubů. Zkušební tyče mohou být kruhového, čtvercového, obdélníkového nebo šestiúhelníkového průřezu. Nejčastěji se používají poměrné tyče, pro jejichž počáteční měrnou délku  $L_0$  platí vztah:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} [mm]$$

kde  $k$  je součinitel proporcionality a  $S_0$  [ $\text{mm}^2$ ] je počáteční plocha příčného průřezu. Pro krátkou zkušební tyč je mezinárodně uznaná hodnota  $k = 5,65$ . Pokud nebude splněna podmínka  $L_0 \geq 15$  mm, jedná se o dlouhou zkušební tyč a  $k = 11,3$ . Lze použít i nepoměrné zkušební tyče [53, 54].

V případě testování vytištěných vzorků nebyla tahová zkouška provedena dle požadavků normy. Zkušební tělesa měla specifický tvar, speciálně navržený pro účely testování tenkostěnných konstrukcí. Nicméně to nemá vliv na výsledky, jelikož vzorky byly zkoušeny za stejných podmínek a porovnávány pouze mezi sebou [53, 54].

Samotná zkouška spočívá v deformaci zkušebního vzorku tahovým zatížením určitou rychlostí, až do úplného přetržení. Zkoušení je prováděno za pokojové teploty v rozmezí od 10  $^{\circ}\text{C}$  do 35  $^{\circ}\text{C}$  na univerzálních zkušebních strojích. Zkušební stroje bývají hydraulické, nebo mechanické a jejich hlavním parametrem je maximální dosažitelná síla. Po přetržení vzorku se deformace vyhodnocují na základě výsledků z extenzometru



(průtahoměru), který je schopný díky laseru změřit i velmi malé deformace. U moderních zkušebních strojů je zkouška řízena za pomoci počítače a průběhu celého zkušebního procesu se do něj i zaznamenává. Mimo jiné se zaznamenává pracovní diagram  $F = f(\Delta L)$ , kde  $F$  je zatěžující síla a  $\Delta L$  je absolutní prodloužení zkušební tyče. Dokud se vzorek deformuje pružně, diagram vykazuje lineární závislost. Když se zkušební tyč začne deformovat plasticky, mění i tvar křivky diagramu. Na základě dat z diagramu a změn rozměrů přetrženého vzorku se určují materiálové charakteristiky [53, 54].

Mez kluzu	$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa]$
-----------	-------------------------------

Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa]$
-------------------	---

Mez pevnosti v tahu	$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa]$
---------------------	-------------------------------

Tažnost	$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%]$
---------	--

Kontrakce	$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 [\%]$
-----------	--

Kde

$F_e$  je síla na mezi kluzu [N]

$F_{p0,2}$  je síla při trvalé deformaci 0,2 % počáteční měřené délky [N]

$F_m$  je maximální síla naměřená před přetržení zkušební tyče [N]

$S_0$  je počáteční příčný průřez [mm<sup>2</sup>]

$S_u$  je nejmenší příčný průřez po přetržení zkušební tyče [mm<sup>2</sup>]

$L_0$  je počáteční délka zkušební tyče [mm]

$L_u$  je konečná délka zkušební tyče po přetržení [mm]

Výsledkem zkoušky tahem jsou tedy materiálové charakteristiky a tahový diagram. Diagram může být dvojího typu – skutečný, nebo smluvní. Přičemž skutečný tahový diagram popisuje závislost skutečného napětí  $\sigma$  na logaritmické deformaci  $\varphi$  [53, 54].

Skutečný tahový diagram  $\sigma = f(\varphi)$

Skutečné napětí  $\sigma = \frac{F}{S} [N/mm]$

Logaritmická deformace  $\varphi = \int_{l_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$

Kde

$F$  je působící síla [N]

$S$  je okamžitá plocha příčného průřezu zkušební tyče [ $mm^2$ ]

$L$  je okamžitá měřená délka zkušební tyče [mm]

Smluvní tahový diagram popisuje závislost smluvního napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  [52, 53].

Smluvní tahový diagram  $R = f(\varepsilon)$

Smluvní napětí  $R = \frac{F}{S_0} [MPa]$

Poměrné prodloužení  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

Kde

$F$  je působící síla [N]

$S_0$  je počáteční plocha příčného průřezu [ $mm^2$ ]

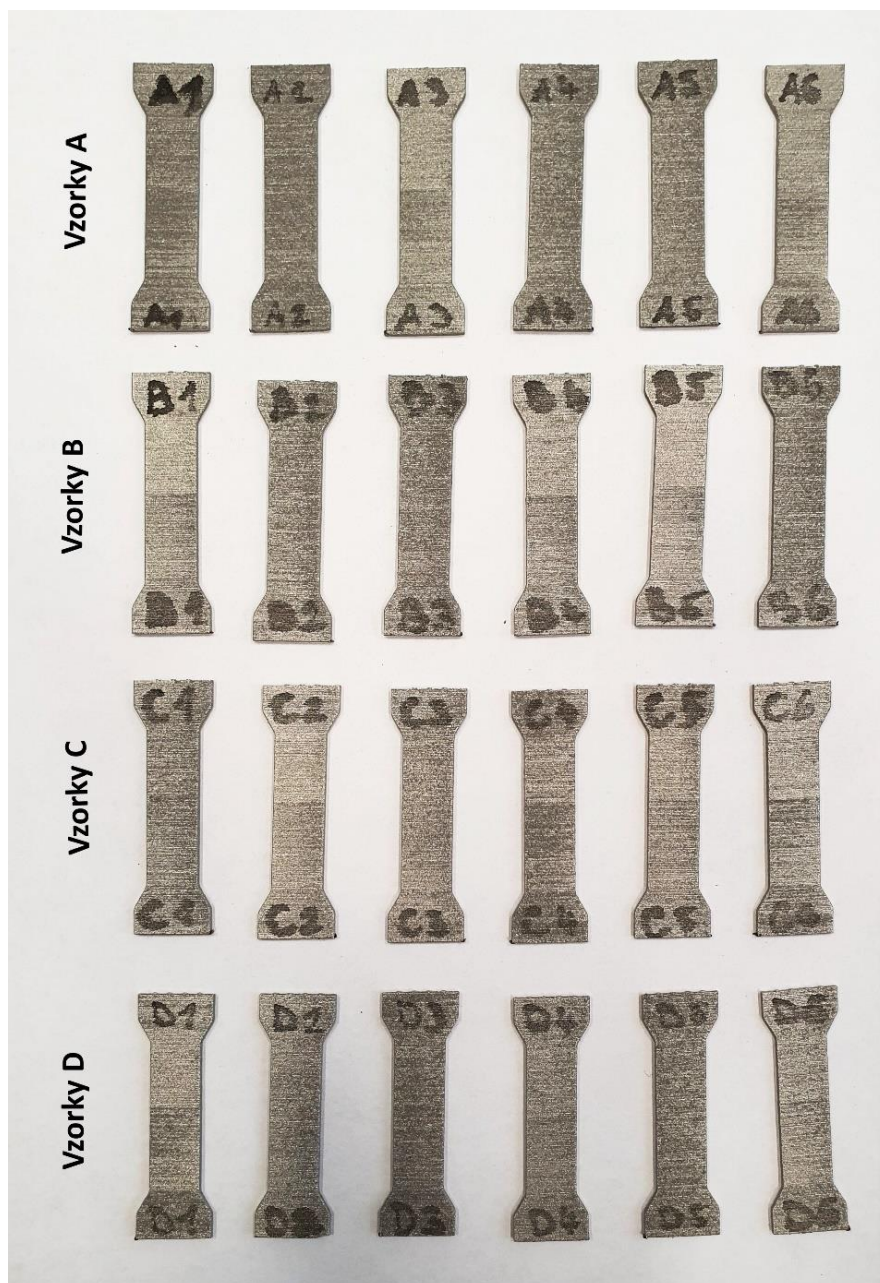
$\Delta L = L - L_0$  je absolutní prodloužení měrné délky vzorku [mm]

### 5.4.1. Zkušební těleso pro zkoušku tahem

Vzorky určené k tahové zkoušce bývají většinou vyrobeny technologií obrábění, nicméně i vzorky vyrobené aditivní technologií jsou přípustné. Podmínkou je, že na zkušebních tělesech nesmí být viditelné vruby, nebo jiné vady, které by výsledky zkoušky značně ovlivnily. Vzorky po dotisknutí prošly vizuální kontrolou a ani jeden nebyl vyhodnocen jako nevyhovující [53].

Co se týče tvaru, tak vzorky byly navrženy speciálně pro účely testování tenkostěnných konstrukcí. Nejsou tedy kruhového, nebo čtvercového průřezu, ale jejich průřez je obdélníkový s navrženým poměrem stran 10:1. Rozměry vytisknutých vzorků se trochu lišily oproti návrhu, zejména v tloušťce. Ta byla z navrhovaného 1 mm navýšena na přibližných 1,35 mm. Viz tabulka č. 6. Příčinou bylo, že ani u jedné strategie nebyl před tiskem nastaven parametr kompenzace kontur, tudíž došlo k mírnému nárůstu rozměrů. Zesílení tloušťky však nemělo negativní dopad na měření. Hodnoty počátečního příčného průřezu  $S_0$ , byly vždy pro každý vzorek počítány zvlášť, na základě skutečných (naměřených) hodnot.

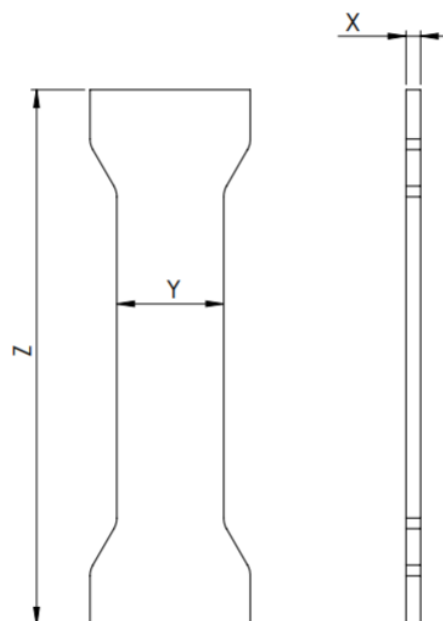
Všechny čtyři sady po šesti vzorcích byly tisknuty na základě stejného modelu s různými tiskovými parametry. Pro zjednodušení byly sady označeny písmeny A, B, C a D a jednotlivé vzorky očíslovány.



Obrázek 41: Vytisknuté vzorky pro zkoušku tahem

Tabulka 5: Rozměry CAD modelu

CAD model	
X (tloušťka)	1 mm
Y (šířka)	10 mm
Z (výška)	50 mm



Obrázek 42: Výkres zkušebního tělesa

Tabulka 6: Skutečné rozměry zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles v milimetrech							
<b>A</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>∅</b>
X (tloušťka)	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,38
Y (šířka)	10,2	10,2	10,2	10,1	10,2	10,2	10,18
Z (výška)	50,1	50	50,1	50	50,1	50,1	50,07
<b>B</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>∅</b>
X (tloušťka)	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,37
Y (šířka)	10,1	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,13
Z (výška)	50,2	50,1	50,2	50,1	50,1	50,1	50,13
<b>C</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>∅</b>
X (tloušťka)	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4	1,35
Y (šířka)	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,15
Z (výška)	50	50	50,1	50,1	50	50	50,03
<b>D</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>∅</b>
X (tloušťka)	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,38
Y (šířka)	10,2	10,1	10,1	10,2	10,2	10,1	10,15
Z (výška)	50,1	50,1	50	50,1	50	50,1	50,07

## 5.4.2. Zkušební zařízení pro zkoušku tahem

Zkouška tahem byla prováděna na zkušebním stroji LabTest 5.100SP1 od firmy LabourTech s.r.o. Jedná se o univerzální trhací stroj ve vertikálním provedení, který je určen pro statické mechanické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, krutu a cylindrickému namáhání.

Tabulka 7: Parametry trhacího stroje LabTest 5.100SP1

Jmenovité zatížení [ <i>kN</i> ]	100
Max. zkušební rychlost [ <i>mm/min</i> ]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [ <i>μm</i> ]	1
Tuhost rámu [ <i>mm/N</i> ]	$1,6 \times 10^{-6}$
Rozpětí sil [ <i>N</i> ]	500 – 600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [ <i>μm</i> ]	1 (ČSN EN 9513)
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 z hodnot průtahoměru



Obrázek 43: Trhací stroj LabTest 5.100SP1

### 5.4.3. Vyhodnocení zkoušky tahem

Zkouška byla prováděna (dle normy DIN EN ISO 6892-1) na výše popsaném trhacím stroji LabTest 5.100SP1, který byl navíc propojen s extenzometrem. Průběh celé zkoušky se zaznamenával každé dvě setiny sekundy do připojeného počítače. Počítač po dokončení každé zkoušky zobrazil protokol s parametry, včetně grafu. Z protokolu je mimo jiné patrné, že zkušební rychlost  $v$  byla nastavena na hodnotu  $1 \text{ mm}/\text{min}$ . Tato rychlost byla konstantní po celou dobu zkoušení pro všechny vzorky.

Před zahájením samotné zkoušky, byla pro každý vzorek vypočítána hodnota počáteční měrné délky vzorku  $L_0$ , která v praxi určovala, jak vzdálené od sebe mají být odrazové štítky odrážející laserový paprsek průtahoměru. Vzdálenost byla spočítána ze vztahu  $L_0 = k\sqrt{S_0} [\text{mm}]$ , kde  $S_0 [\text{mm}^2]$  je počáteční plocha příčného průřezu a  $k$  je součinitel proporcionality. Vzhledem k rozměrům zkušebního tělesa, byla hodnota  $k$  zvolena

stejně jako pro krátkou zkušební tyč. Tedy 5,65. Tahové zkoušky byly postupně podrobeny všechny vzorky ze čtyř sad a naměřené hodnoty zaznamenány do tabulky č. 8

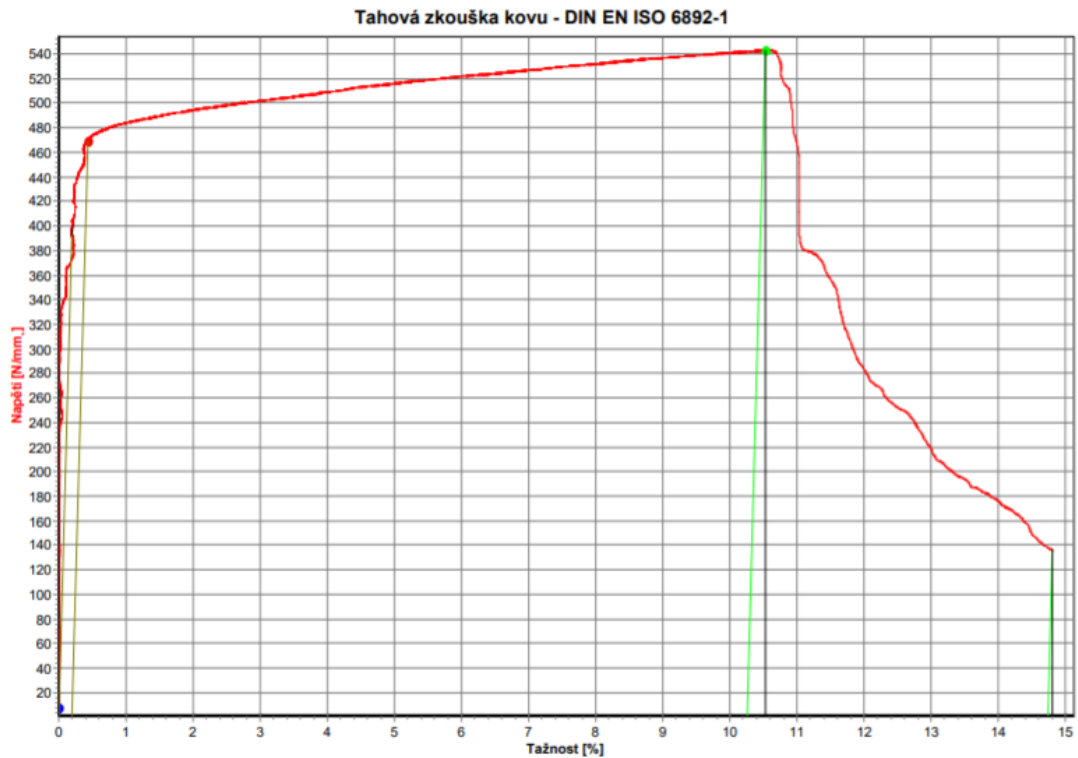
Aby výsledky byly vypovídající a nezkreslené, bylo zapotřebí vyselektovat nevyhovující vzorky. Za nevyhovující byly označeny ty, při jejichž měření došlo k chybě, nebo byly přetrženy mimo sledovanou oblast. Za chybný byl označen například vzorek C6, u kterého po spuštění zkoušky průtahoměr přestal měřit vzdálenost mezi odrazovými štítky připevněnými na vzorku. Vzorky k jejichž přetržení došlo mimo sledovanou oblast jsou nevyhovující z toho důvodu, že průtahoměr nemohl zaznamenat jejich přetržení. Grafy z těchto měření jsou zkrácené a hodnoty tažnosti  $A$  nízké.



Tabulka 8: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou

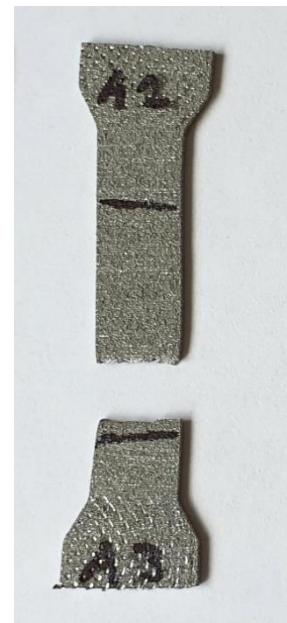
Parametry	R <sub>p0,2</sub>	F <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	F <sub>m</sub>	A	E	t
Vzorky	[MPa]	[N]	[MPa]	[N]	[%]	[GPa]	[s]
<b>Chess opt.</b>							
A1	270	3851,8	516	7368,2	14,93	203,325	669,28
A2	470	6445,7	543	7204,7	14,74	197,118	502,18
A3	256	3649,3	550	7849,3	32,66	197,15	720,44
A4	345	4885,5	477	6742,9	13,48	205,258	336,76
A5	370	5278,5	454	6482,9	6	217,146	201,44
A6	323	4608,2	534	7624,5	30,25	210,883	739,12
∅	339	4786,5	512,33	7212,08	18,68	205,147	528,2
<b>Meander</b>							
B1	445	5838,3	579	7603,7	30,1	221,576	695,02
B2	338	4820	511	7295,1	17,21	199,599	524,52
B3	285	4070,3	508	7257,8	15,62	200,586	451,6
B4	417	5947,8	521	7437,9	21,69	225,762	520,4
B5	342	4838,1	544	7692,4	37,45	219,862	820,84
B6	359	5073,3	522	7385,8	18,84	212,721	569,82
∅	364,33	5097,97	530,83	7445,45	23,49	213,351	597,03
<b>Stripes</b>							
C1	284	3766,5	519	6876,9	17,41	221,984	400,18
C2	467	6187,9	529	7014,7	10,8	211,472	343,64
C3	263	3748,5	458	6545,9	4,63	205,757	275,76
C4	342	4842,3	429	6068,1	1,24	216,397	227,86
C5	418	5486,9	533	6998,3	12	211,479	312,82
C6	-	-	460	6506,5	-	-	269,32
∅	354,8	4806,42	488	6668,4	9,22	213,418	304,93
<b>Chess</b>							
D1	482	6334,1	528	6935	9,14	205,485	416,32
D2	376	5310,2	486	6865,5	15,5	212,908	407,18
D3	307	4346,6	414	5852,5	1,67	216,794	230,7
D4	320	4572,6	446	6362	8,09	202,189	273,64
D5	267	3813,6	451	6438,1	5,56	220,918	323,62
D6	377	5327,2	441	6231,8	6,11	207,912	247,36
∅	354,83	4950,72	461	6447,48	7,68	211,034	316,47

## Vzorek A2



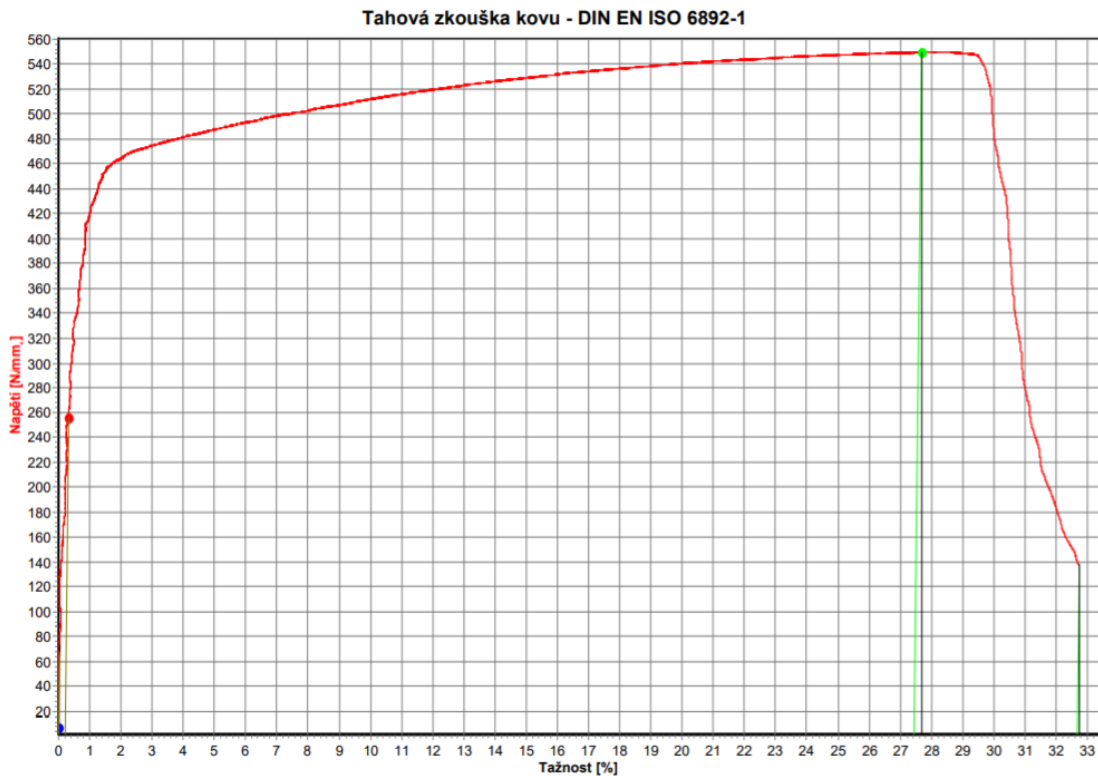
Graf 2: Diagram zkoušky tahem – vzorek A2

U prvního vzorku, který byl označen za vyhovující, je z grafu patrné, že vzorek nebyl přetržen v jeden moment. Trhlina se šířila postupně a narůstala tak tažnost až na hodnotu 14,74 %. Smluvní mez kluzu se zastavila na hodnotě 479 MPa a mez pevnosti na 543 MPa.



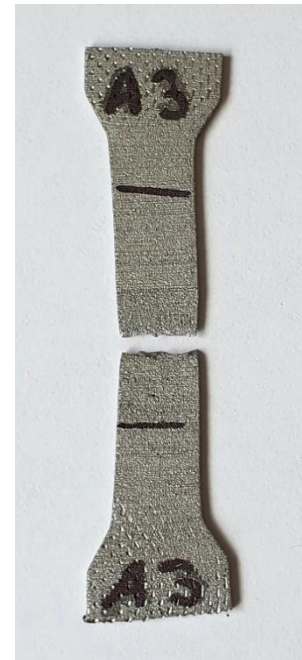
Obrázek 44: Vzorek A2 po přetržení

## Vzorek A3



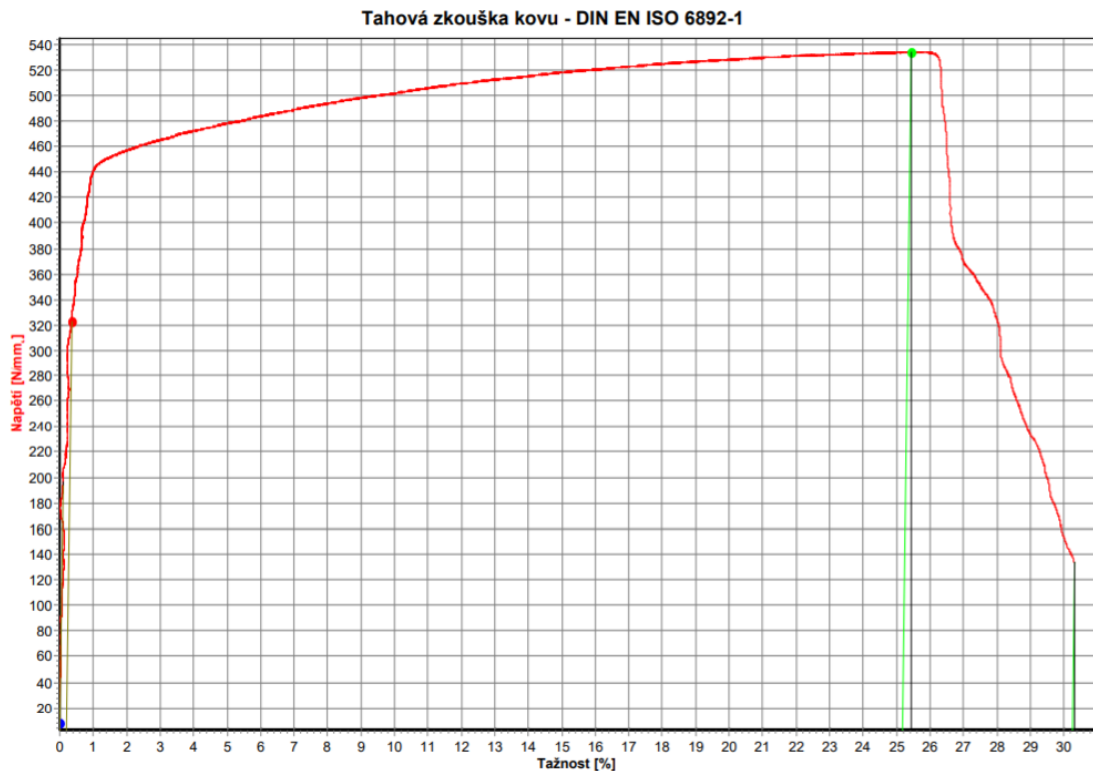
Graf 3: Diagram zkoušky tahem – vzorek A3

Vzorek druhý, označený A3, vykazuje vysokou tažnost 32,66 %, přičemž k výraznému poklesu napětí dojde za hranicí 29 %. Smluvní mez kluzu s hodnotou 256 MPa je oproti prvnímu vzorku výrazně nižší. Na druhou stranu hodnoty mezí pevnosti jsou si velice podobné. U vzorku A3 dosahuje hodnoty 550 MPa.



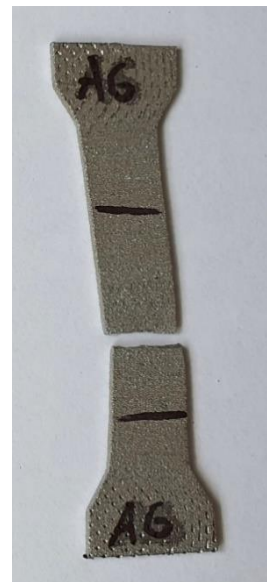
Obrázek 45: Vzorek A3 po přetržení

## Vzorek A6



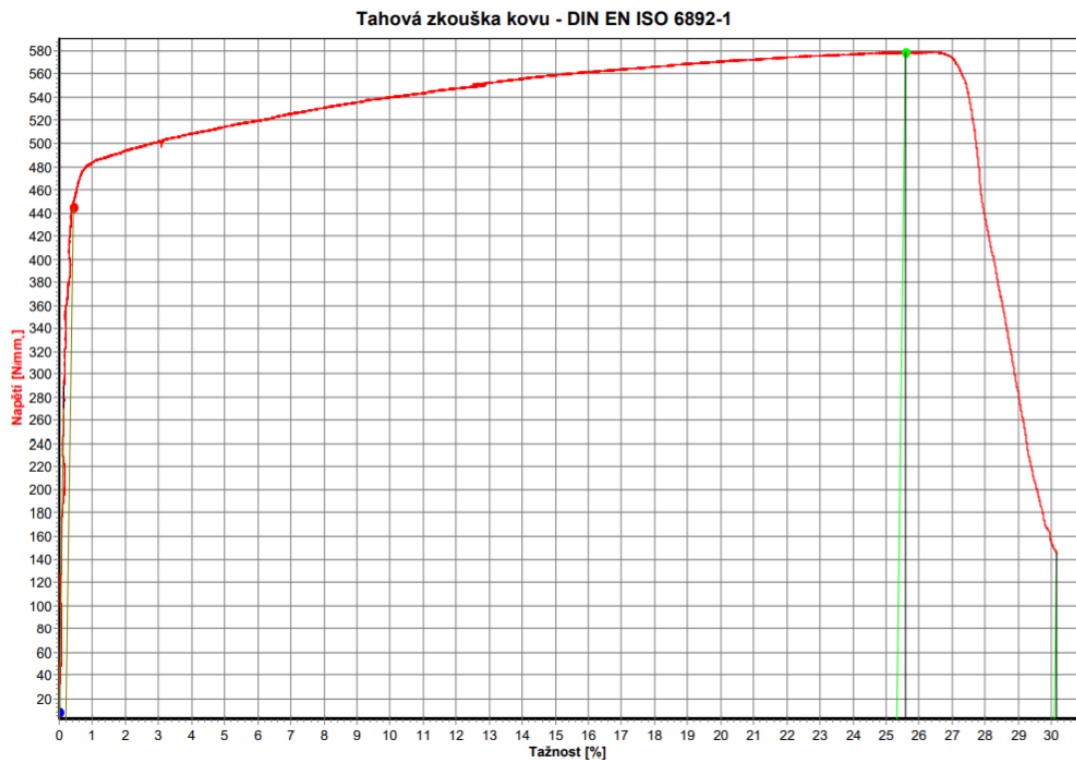
Graf 4: Diagram zkoušky tahem – vzorek A6

Vzorek A6 byl po zkoušce viditelně deformovaný. Deformace je nejvíce patrná v horní části, kde boky vzorku nejsou kolmé k vrchní hraně. Deformace podobného charakteru jsou připisovány nepřesnému upnutí mezi čelisti zkušebního stroje. Navzdory větší deformaci jsou hodnoty i tvar grafu podobné vzorku A3. Tažnost 33 %, mez pevnosti 534 MPa a smluvní mez pevnosti byla dokonce vyšší, 323 MPa.



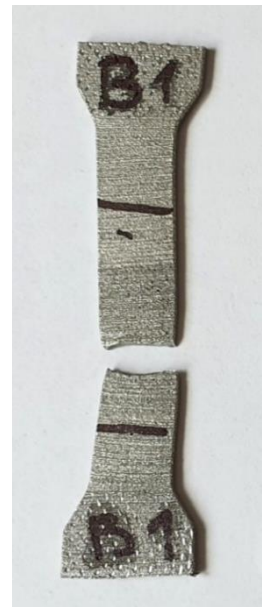
Obrázek 46: Vzorek A6 po přetržení

## Vzorek B1



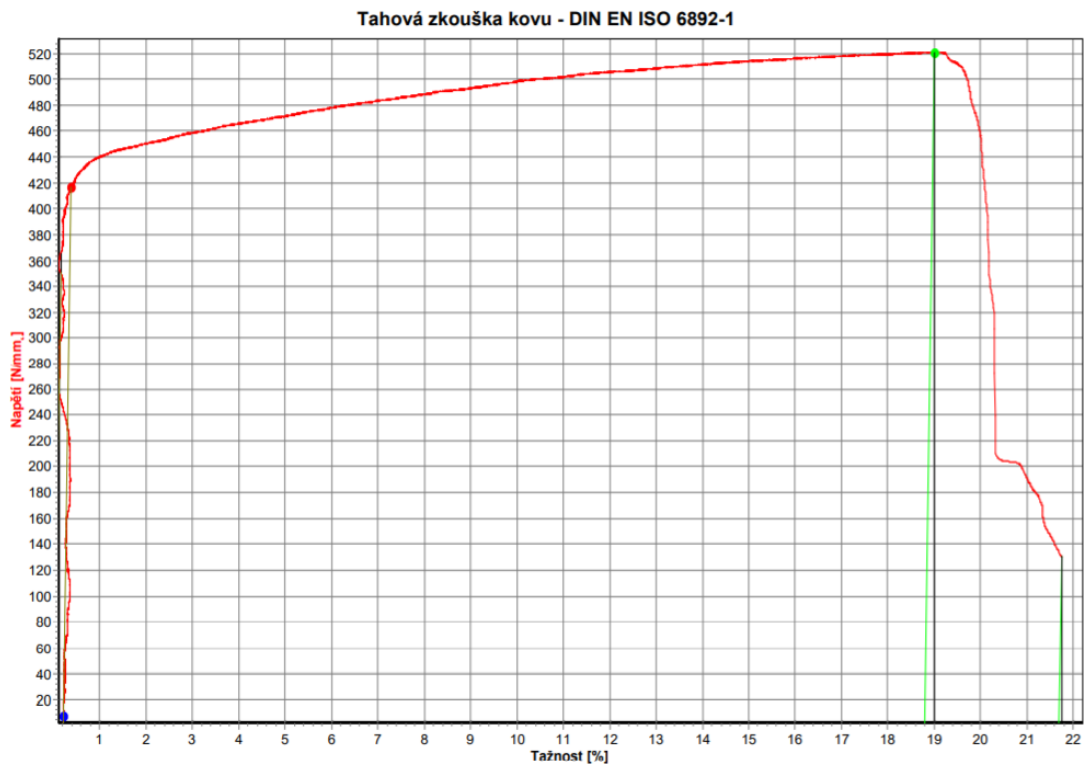
Graf 5: Diagram zkoušky tahem – vzorek B1

Vzorek B1 byl první testovaný kus ze sady, která byla tisknuta strategií Meander. Při trhání vzorku klesalo napětí lineárně a výsledná tažnost byla 30,1 %. Hodnota meze pevnosti byla vůbec nejvyšší naměřená, 579 MPa. Při měření byla zaznamenána smluvní hodnota meze kluzu 445 MPa.



Obrázek 47: Vzorek B1 po přetržení

## Vzorek B4



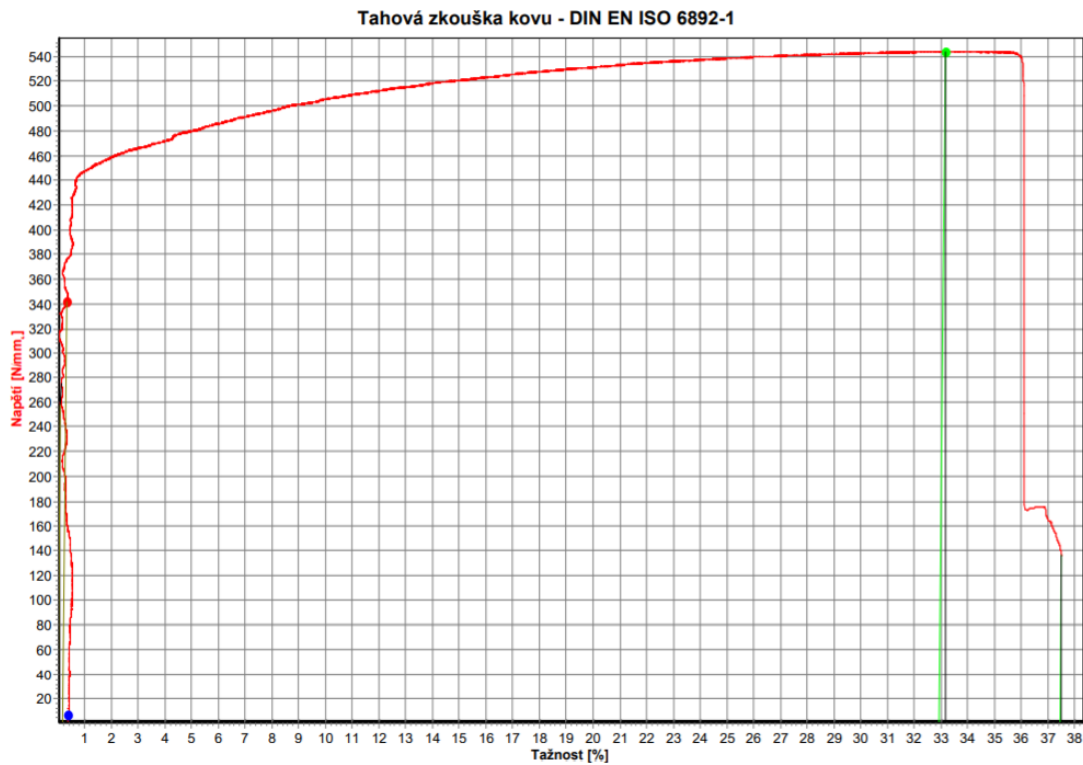
Graf 6: Diagram zkoušky tahem – vzorek B4

U vzorku s označením B4 je viditelný rychlý pokles napětí, takřka hned po dosažení meze pevnosti. Ta měla hodnotu 521 MPa. Prudce klesající křivka značí rychlé šíření trhliny. Smluvní mez kluzu u zkušebního vzorku B4 byla 417 MPa a tažnost 21,69 %.



Obrázek 48: Vzorek B4 po přetržení

## Vzorek B5



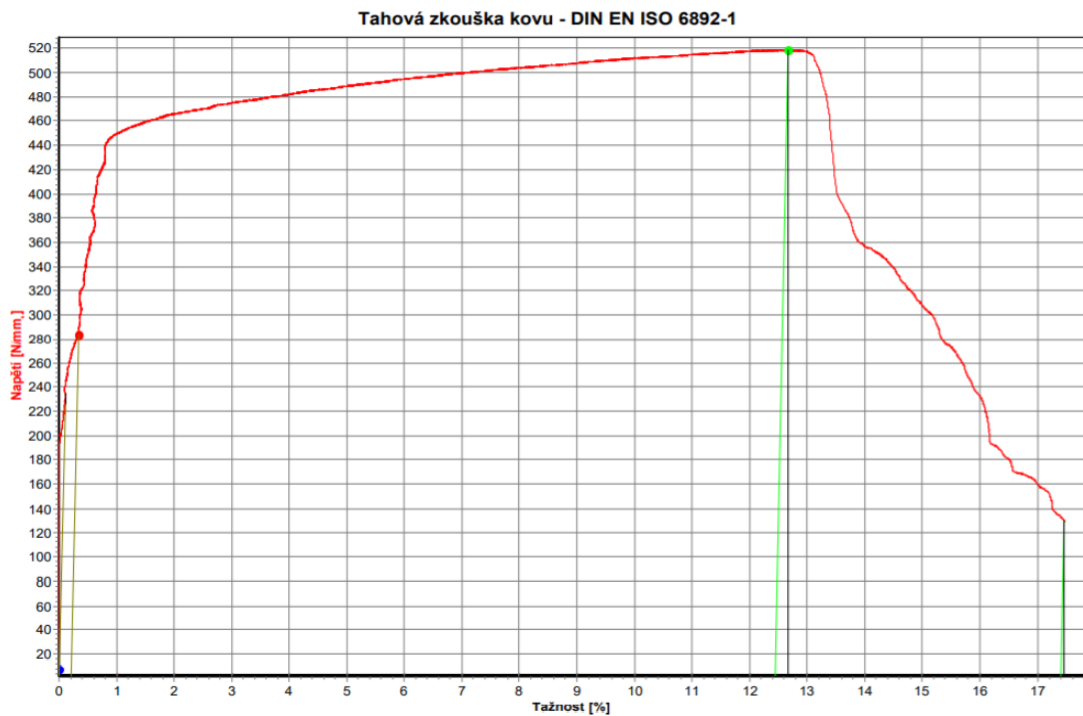
Graf 7: Diagram zkoušky tahem – vzorek B5

Při měření materiálových charakteristik vzorku B5 byla zjištěna hodnota smluvní meze kluzu 342 MPa, hodnota meze pevnosti 533 MPa a tažnost 37,45 %. Pokles napětí byl takřka okamžitý. Z toho vyplývá, že zkušební těleso bylo celé přetrženo v jeden okamžik, podobně jako u B4.



Obrázek 49: Vzorek B5 po přetržení

## Vzorek C1



Graf 8: Diagram zkoušky tahem – vzorek C1

Vzorek C1 vykázal vysokou mez pevnosti s hodnotou 519 MPa, nicméně smluvní mez kluzu 284 MPa a tažnost 17,41 % dosahovaly podprůměrné hodnoty ve srovnání s doposud naměřenými výsledky. Pokles napětí byl pozvolný, což poukazuje na postupné šíření trhliny.



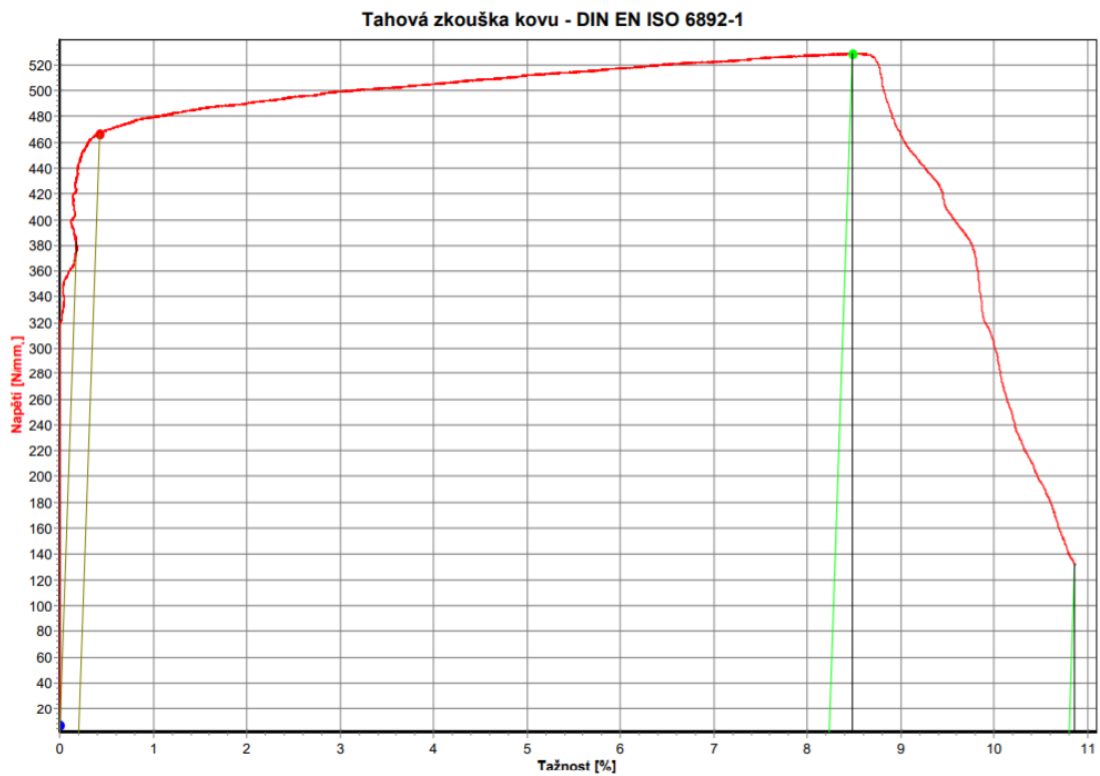
Obrázek 51: Vzorek C1 při zkoušce tahem



Obrázek 50: Vzorek C1 po přetržení



## Vzorek C2



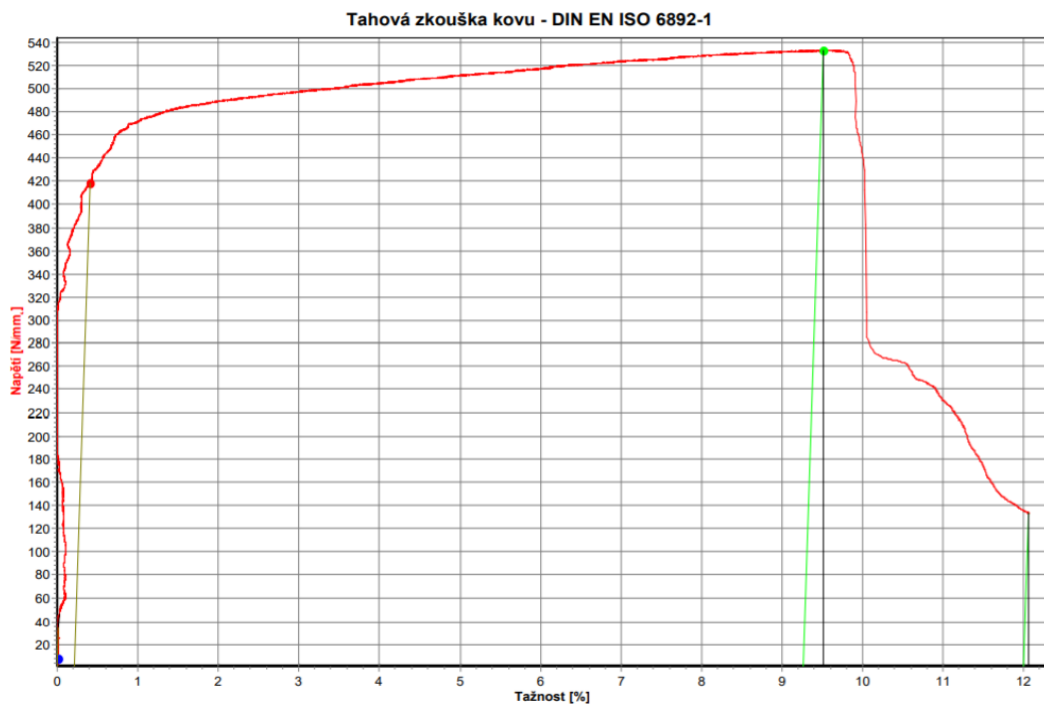
Graf 9: Diagram zkoušky tahem – vzorek C2

U vzorku C2 byla zaznamenána nízká tažnost ve srovnání s doposud testovanými vzorky. Pouhých 10,8 %. Smluvní mez kluzu dosahovala hodnoty 467 MPa a mez pevnosti 529 MPa.



Obrázek 52: Vzorek C2 po přetržení

## Vzorek C5



Graf 10: Diagram zkoušky tahem – vzorek C5

Vzorek C5 zaznamenal tažnost 12 %, smluvní mez kluzu měla hodnotu 418 MPa a mez pevnosti 533 MPa. Oproti vzorku C1, kde se lom šířil napříč několika tiskovými vrstvami, se u zkušebního tělesa C5 šířil téměř horizontálně.

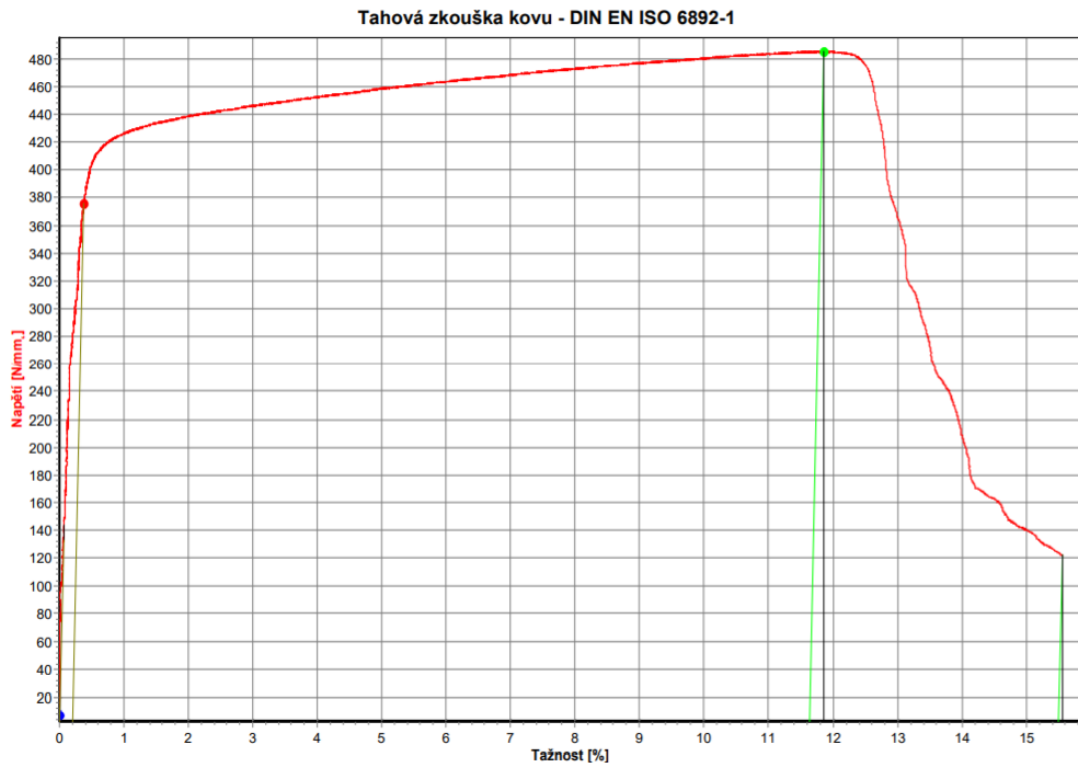


Obrázek 54: Vzorek C5 při zkoušce tahem



Obrázek 53: Vzorek C5 po přetržení

## Vzorek D2



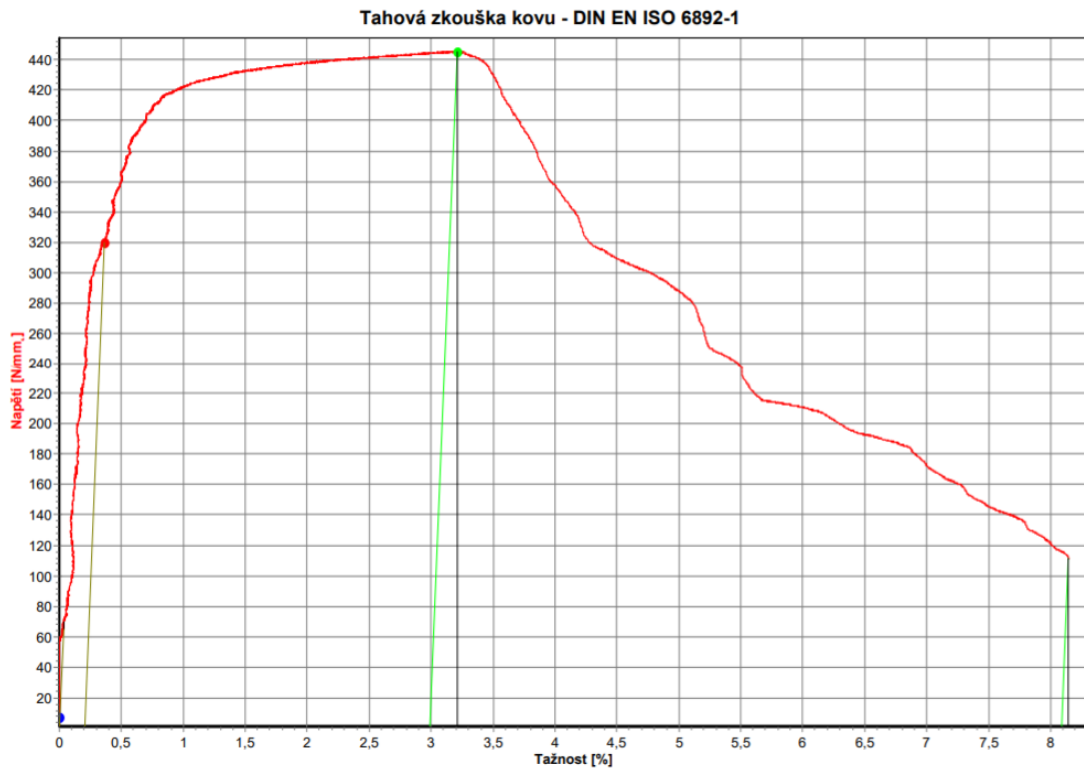
Graf 11: Diagram zkoušky tahem – vzorek D2

První vyhovující vzorek ze sady tisknuté strategií Chess, vzorek D2, dosáhl smluvní meze kluzu 376 MPa, meze pevnosti 486 MPa a tažnosti 15,5 %.



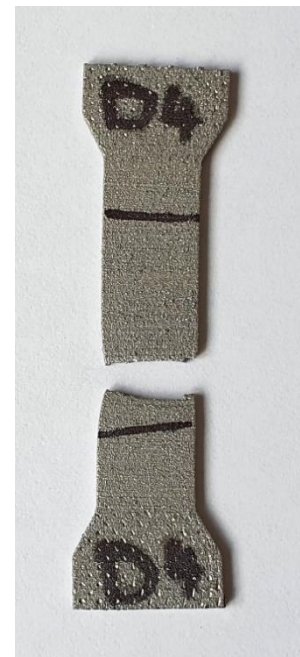
Obrázek 55: Vzorek D2 po přetržení

## Vzorek D4



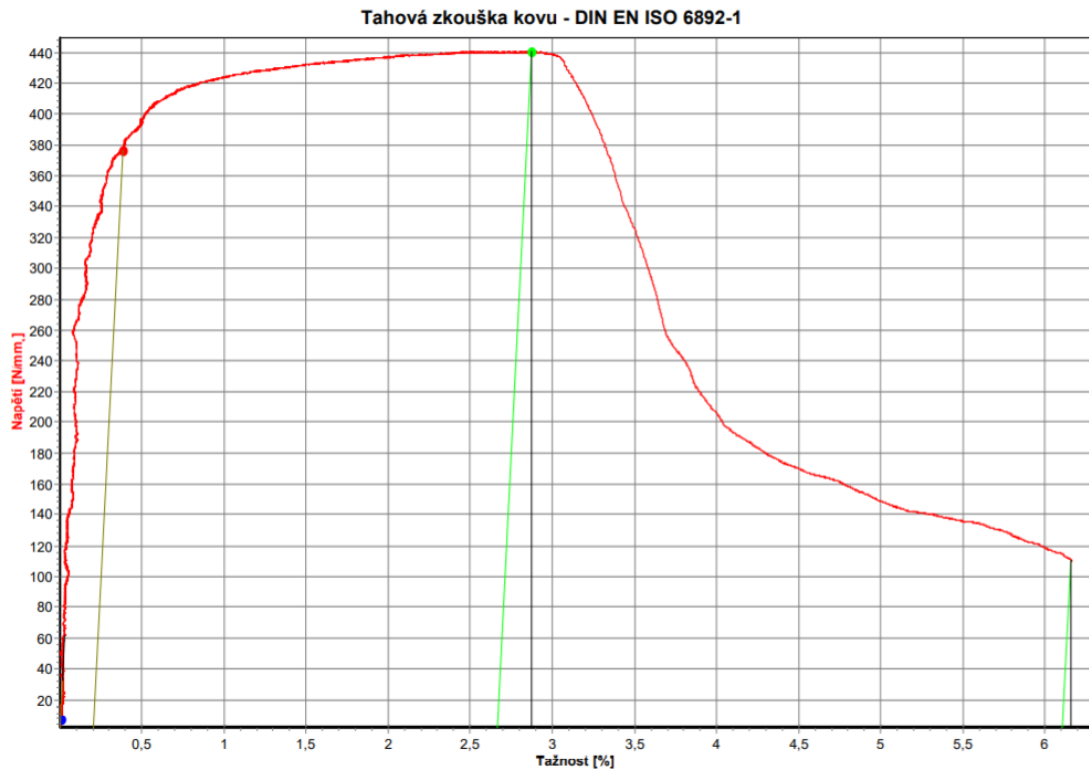
Graf 12: Diagram zkoušky tahem – vzorek D4

U vzorku D4 byla naměřena smluvní mez kluzu 320 MPa a mez pevnosti 446 MPa. Po dosažení meze pevnosti byl zaznamenán značný nárůst délky. Celková tažnost se dostala na hodnotu 8,09 %, ale tažnost při maximálním zatížení ( $A_g$ ) byla pouhých 2,99 %.



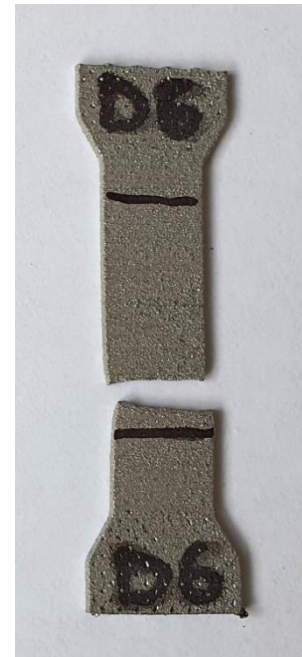
Obrázek 56: Vzorek D4 po přetržení

## Vzorek D6



Graf 13: Diagram zkoušky tahem – vzorek D6

Zkušební vzorek D6 byl polední kus podrobený tahové zkoušce a zaznamenal vůbec nejnižší naměřenou tažnost. Pouze 6,11 %. Tažnost při maximálním zatížení ( $A_g$ ) byla s hodnotou 2,66 % také nejnižší naměřená. Hodnota smluvní meze kluzu byla 377 MPa a hodnota meze pevnosti 441 MPa. Pokles napětí byl opět povolený, jako u vzorku D4.



Obrázek 57: Vzorek D6 po přetržení

V každém z dvanácti grafů zobrazující závislost napětí na prodloužení zkušební tělesa je zobrazeno několik barevných bodů. Modrý bod vyznačuje počátek zkoušky, červený smluvní mez kluzu a zelený mez pevnosti. Okamžik, kdy došlo k přetržení vzorku je znázorněn ukončením červené křivky. Souhrnná tabulka č. 9 zobrazuje všechny vyhovující vzorky a jejich hodnoty získané při tahové zkoušce.

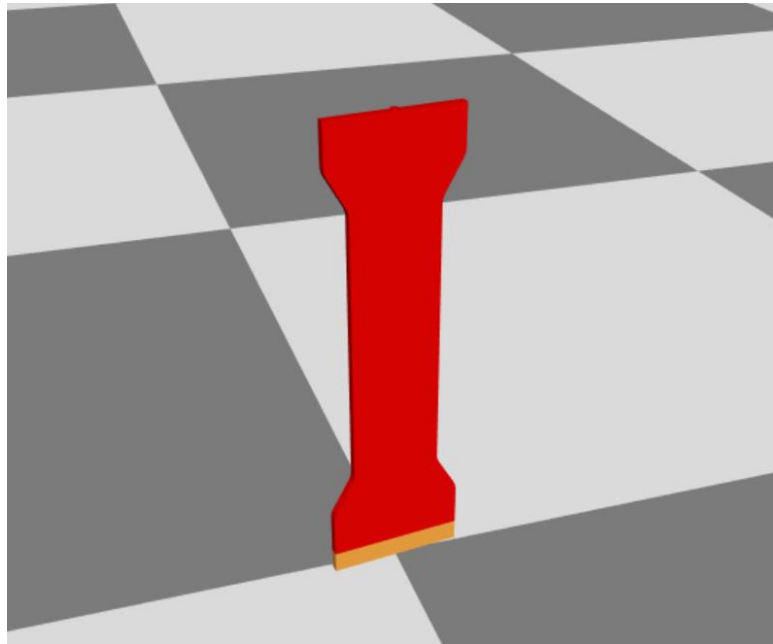
Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny i hodnoty, které udává v katalogovém listu výrobce prášku. Hodnoty z katalogu jsou v tabulce uvedeny pro vertikální směr (směr osy Z), stejně jak byly vzorky zkoušeny. Jediná naměřená hodnota, která převyšovala hodnotu uvedenou v katalogovém listu, byla hodnota modulu pružnosti. Ostatní hodnoty byly nižší, než je uvádí výrobce prášku. Hodnoty naměřené při zkoušce tahem jsou závislé na zvolené tiskové strategii a parametrech. Dobře je to patrné, pokud srovnáme strategii Chess optimalizovanou se strategií Chess. Jedná se o stejnou tiskovou strategii s rozdílnými parametry a materiálové charakteristiky se liší.

Tabulka 9: Naměřené a katalogové materiálové charakteristiky

Parametry	R <sub>p0,2</sub>	F <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	F <sub>m</sub>	A	E	t
Vzorky	[MPa]	[N]	[MPa]	[N]	[%]	[GPa]	[s]
<b>Chess opt.</b>							
A2	470	6445,7	543	7204,7	14,74	197,118	502,18
A3	256	3649,3	550	7849,3	32,66	197,15	720,44
A6	323	4608,2	534	7624,5	30,25	210,883	739,12
∅	350	4901,1	542,33	7559,50	25,88	201,72	653,9
<b>Meander</b>							
B1	445	5838,3	579	7603,7	30,1	221,576	695,02
B4	417	5947,8	521	7437,9	21,69	225,762	520,4
B5	342	4838,1	544	7692,4	37,45	219,862	820,84
∅	401,33	5541,40	548,00	7578,00	29,75	222,40	678,75
<b>Stripes</b>							
C1	284	3766,5	519	6876,9	17,41	221,984	400,18
C2	467	6187,9	529	7014,7	10,8	211,472	343,64
C5	418	5486,9	533	6998,3	12	211,479	312,82
∅	389,7	5147,10	527	6963,3	13,40	214,98	352,21
<b>Chess</b>							
D2	376	5310,2	486	6865,5	15,5	212,908	407,18
D4	320	4572,6	446	6362	8,09	202,189	273,64
D6	377	5327,2	441	6231,8	6,11	207,912	247,36
∅	357,67	5070,00	458	6486,43	9,90	207,67	309,39
<b>Renisaw</b>							
Katalog	-	-	624 ± 17	-	35 ± 8	190 ± 10	-

## 5.5. Simulace

Tahová zkouška přinesla výsledky pro hodnocení pevnosti a plasticity jednotlivých vzorků. Simulace byla použita jako nástroj pro vyhodnocení posuvů a napětí ve vzorcích po dokončení tisku a následného oddělení od platformy. Vyhodnocována byla každá ze čtyř tiskových strategií. Simulace probíhala v prostředí programu Ansys Additive, do kterého byla nahrávána stejná data jako do tiskárny Renishaw AM250. Tudíž se jednalo o stejný model, ve stejné poloze a se stejnými tiskovými parametry. Additive sice umožňuje nahrát samostatný model a následně vygenerovat podpory dílu, ale podpory by mohly mít jiné parametry a ovlivnily by tak výsledky simulace.



*Obrázek 58: Vzorek A s podpěrami po nahrání dat do Ansys Additive*

Ze tří typů simulací byla aplikována ta nejdůkladnější, která podrobí součást tepelně-mechanické analýze. Do úvahy se berou jednotlivé skenovací vektory i tepelná vodivost materiálu. Vliv tepelného namáhání je při 3D tisku zásadní. Laser natavuje materiál lokálně a do hloubky až čtyř vrstev. Proto bylo nutné softwaru poskytnout detailnější informace o tiskových parametrech, parametrech tiskárny i vlastnostech materiálu. Výchozí hodnoty pro materiál AISI 316L, které měl program přednastavené byly

upřesněny dle parametrů výrobce kokového prášku. Stejně tak byla upravena informace o výkonu laseru.

The screenshot displays a simulation management interface with the following sections:

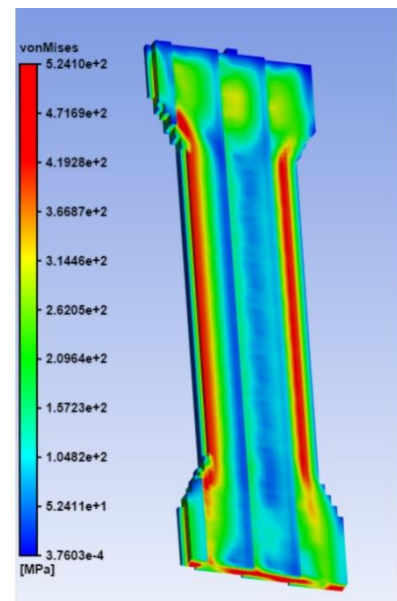
- Overview:**
  - Result ID: 23
  - Status: Success
  - Title: (3) Thermal strain - vzorekA
  - Requested: 17 hours ago, 7/7/20, 3:49 PM
  - Completed: 12 hours ago, 7/7/20, 9:37 PM
  - Simulation Type: Thermal Strain
  - Number of Cores: 4
- Build File:**
  - Name: vzorekA
  - Machine Type: Renishaw
  - Size (x,y,z): 130.15 mm, 21.16 mm, 50.20 mm
  - Number Of Layers: 1,003
  - Layer Thickness: 50 µm
  - Voxel Size: 0.5 mm
  - Voxel Sample Rate: 5
- Material:**
  - Material: 316L (Beta)
  - Stress Mode: J2 Plasticity
  - Load Stepping Type: Dynamic Load Stepping
  - Hardening Factor: 0.0018
  - Yield Strength: 530 MPa
  - Elastic Modulus: 193 GPa
  - Poisson Ratio: 0.25
  - Strain Scaling Factor: 1
  - Anisotropic Strain Coefficients (I): 1.5
  - Anisotropic Strain Coefficients (-): 0.5
  - Anisotropic Strain Coefficients (Z): 1
- Outputs Selected:**
  - On-plate residual stress/distortion ✓
  - Include on-plate strain output ✓
  - Distortion compensated STL file ✓ (Scale Factor: 1)
  - Supports residual stress/distortion ✓
  - Displacement after cutoff (Part and Support Cutoff) ✓
  - Distortion compensated STL file (after cutoff) ✓ (Scale Factor: 1)
  - Layer by layer stress/distortion ✓
  - ANSYS mechanical files ✓
  - Detect potential blade crash due to distortion ✓ (Threshold Scaling Factor: 1, Layer Thickness: 50 µm)
  - High strain areas ✓ (Support Strain Threshold: 10%, Part Strain Threshold: 20%, Strain Warning Factor: 0.8)
- Activity Status:**
  - Voxelization - Finished
  - Slicer - Finished
  - Thermal Solver - Finished
  - Mechanics Solver - Finished
  - Distortion Compensation - Finished
  - VTK to AVZ Conversion - Finished
- Logs:**
  - 7/7/20, 9:37 PM: Simulation 23 completed.

Obrázek 59: Souhrnné informace po dokončení simulace

### 5.5.1. Vyhodnocení simulací

Výsledky simulací byly vyhodnocovány v prostředí programů Ansys Viewer a ParaView. Oba programy umožňují graficky zobrazit data exportovaná z Ansys Additive.

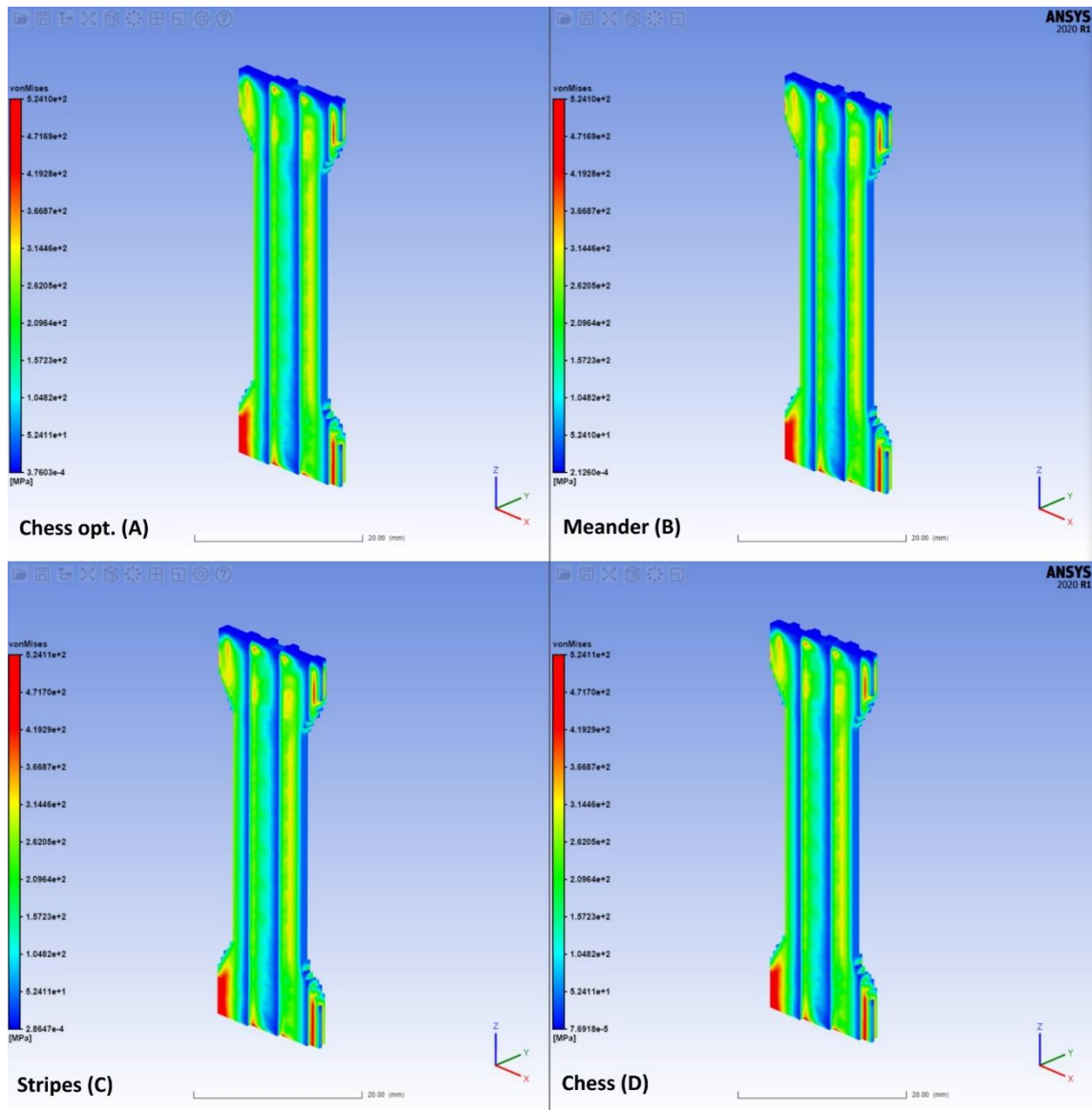
První graficky znázorněná data jsou výsledné napětové účinky reprezentovány napětím von Mises. Jedná se o redukované napětí, které je rozhodující při hodnocení konstrukce vzhledem k meznímu stavu pružnosti. Hodnoty napětí von Mises u všech čtyř strategií jsou velice vyrovnané. Maximální hodnoty vykazovaly všechny strategie téměř shodné, 524 MPa. Takové napětí bylo ve spodních částech vzorků po dokončení tisku před oddělením z platformy (viz obrázek č. 61). Na druhých stranách dílů jsou vidět oblasti s maximálním napětím 423 MPa. Takto zvýšené napětí je patrné po okrajích



Obrázek 60: Vzorek A – napětí von Mises



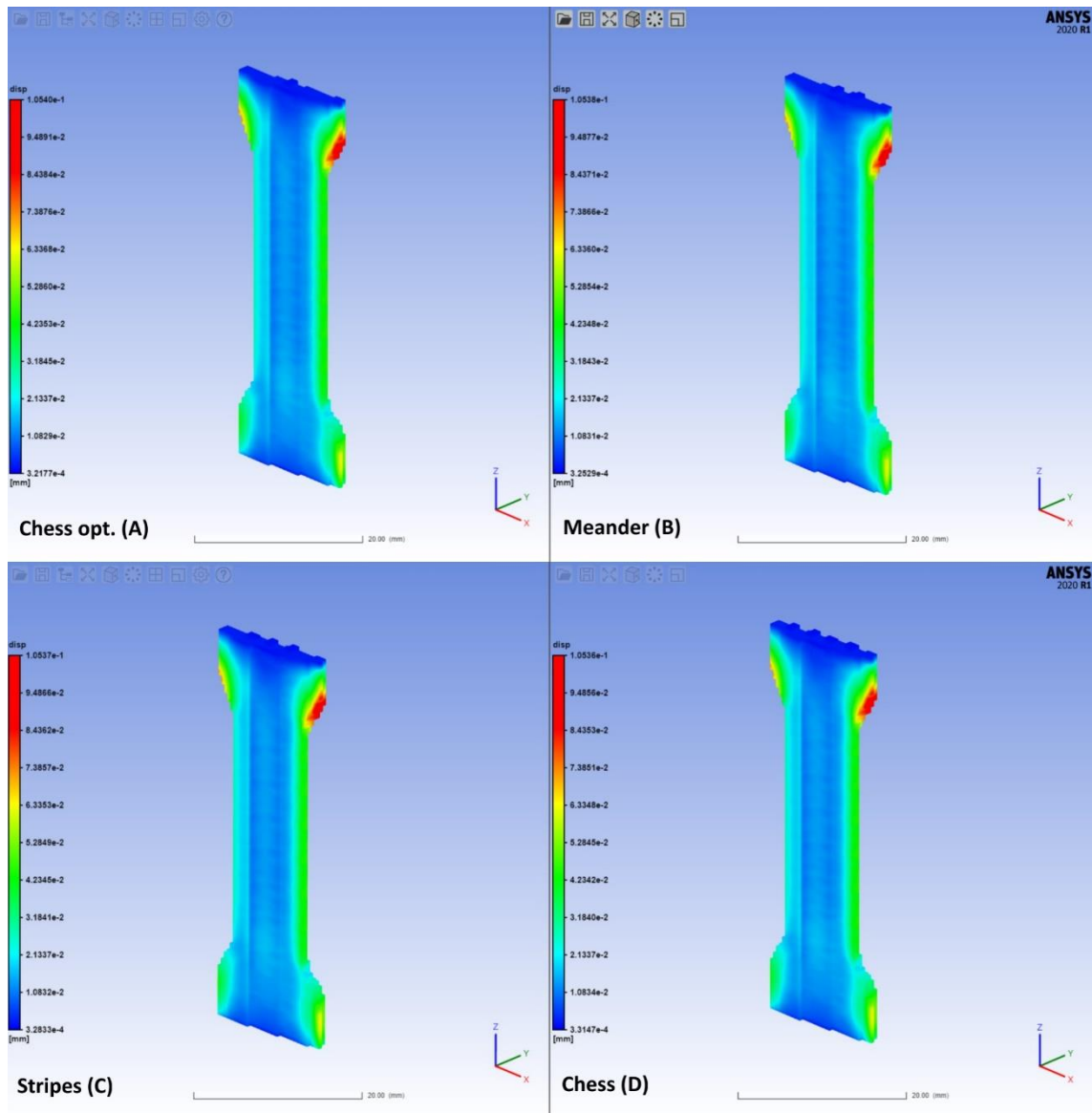
zúžené části, jak je demonstrováno na vzorku A na obrázku č. 60. Úplný vršek součásti je takřka bez napětí. Jedná se o poslední tisknuté vrstvy, ze kterých bylo teplo dobře odváděno a další vrstvy nebránily ve smršťování materiálu při chladnutí.



Obrázek 61: Napětí von Mises u všech vzorků

Druhé grafické znázornění zobrazuje deformační posuv. Nejedná se o pohyb tělesa vůči souřadnicovému systému, ale pouze o změnu pohybového vektoru určitých bodů tělesa. Maximální hodnoty posuvu dosahují 0,105 mm, a to u všech čtyř tiskových strategií. Tyto hodnoty jsou výhradně ve vrchních částech vzorků, kde dochází k jejich rozšíření. Tento posuv vychází z podstaty konstrukce dílu. Samotný prášek neslouží jako nosný prvek,

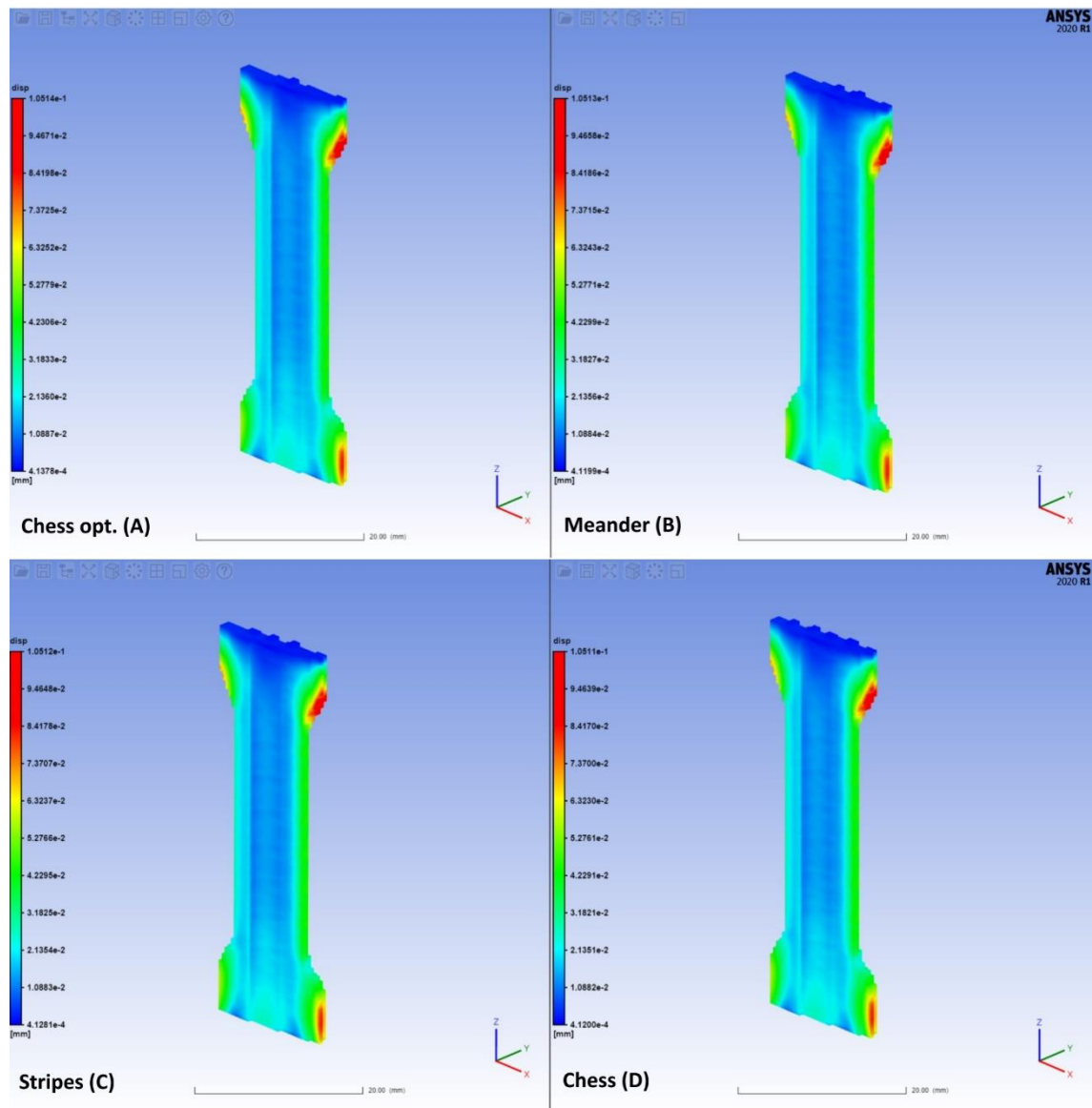
proto úhel mezi platformou a hranou dílu nemůže být menší jak  $45^\circ$ . Ačkoli je úhel u vzorku větší, k určitému posuvu stále dochází. Řešením je použití podpor, které ale přináší jisté nevýhody. Například větší spotřebu materiálu, nutnost apretace nebo zhoršení kvality povrchu.



Obrázek 62: Deformační posuv před oddělením vzorků z tiskové platformy

Nejmenší hodnoty deformačního posuvu se nacházejí na vrcholu dílu, kde bylo zaznamenáno nejmenší napětí. Na spodní části je posuv malý kvůli pevnému spojení s platformou.

Doposud byly vzorky zobrazovány ve stavu, kdy jsou pevně spojeny se stavební platformou. Na obrázku č. 63 je zobrazený stav deformačního posuvu po oddělení vzorků. Mezní hodnoty zůstaly bez výrazných změn a nárůst hodnot posuvu byl zaznamenán pouze ve spodní části dílu – z původních 0,004 mm na 0,024 mm. Hodnoty se opět nelišily v závislosti na tiskové strategii. K mírnému nárůstu deformace po oddělení z platformy dochází u všech dílů vyrobených aditivní technologií.



Obrázek 63: Deformační posuv po oddělení vzorků z tiskové platformy

V případě navrženého tělesa lze konstatovat, že velikosti napětí, posuvů a dalších účinků jsou téměř nezávislé na volbě tiskové strategie. Z grafických výstupů jsou patrné pouze

minimální rozdíly mezi jednotlivými vzorky. Na malé ploše 10 mm<sup>2</sup> se vliv tiskové strategie dostatečně neprojevil. Samotná konstrukce dílu nemá velké rozměry a je velice jednoduchá. Tloušťka stěny je po celé délce stejná, tudíž byla velká část vneseného tepla dobře odváděna okolním práškem.

Na základě výsledků z numerické simulace lze všechny čtyři tiskové strategie s konkrétními parametry označit za vyhovující. Ani jeden ze vzorků nebyl nijak výrazněji deformován. Kvůli velice vyrovnaným výsledkům nelze označit jednu tiskovou strategii za vhodnější a upřednostnit ji před ostatními pro tisk této konkrétní konstrukce.

## 6. Závěrečné zhodnocení

Teoretická část diplomové práce zmapovala vývoj aditivních technologií a jejich rozdělení. U vybraných technologií zaměřených na tisk kovových dílů jsem detailněji popsal jejich princip i využití. Nejpodrobněji byl popsán princip technologie Direct Metal Laser Sintering, který byl použit pro tisk vzorků v praktické části. V části teoretické jsem neopomenul ani materiály, které se v 3D tisku používají. Jedná se především o práškové kovy.

Dále práce popsala využití numerických simulací v průmyslu a odůvodnila, proč právě v aditivní výrobě mají simulace takový přínos. Popsány byly také konkrétní programy s jejich vlastnostmi a využitím. Přiblížil jsem také metodu konečných prvků, na jejímž principu zmíněné programy pracují – jako programu Ansys Additive. Licenci mi zapůjčila firma TechSoft Engineering.

Podmínky konstrukce a tiskové parametry jsem detailně popsal v teoretické části diplomové práce a následně aplikoval v části praktické. Ta měla za úkol najít nejvhodnější tiskovou strategii pro tisk tenkostěnných dílů, proto jsem navrhl model zkušebního vzorku, který splňoval celou řadu podmínek. Jeho konstrukce byla tenkostěnná, vhodná pro zkoušku tahem a splňovala všechny podmínky technologičnosti konstrukce dílu, který se tiskne technologií DMLS. Když byla známa podoba dílu, přišel na řadu způsob tisku. Zvolil jsem čtyři tiskové strategie s konkrétními tiskovými parametry. V posledním kroku jsem volil polohu dílu – volba byla celkem jednoznačná. Díl se tisknul na výšku bez použití podpor. V této poloze je totiž největší pravděpodobnost, že se projeví deformace takto tenké konstrukce. Celkem byly vytisknuty čtyři sady po šesti vzorcích. Tisk probíhal na tiskárně Renishaw AM250 společností METAL3D s.r.o. Všechny vzorky se tiskly přibližně 13 minut. Žádná ze strategií se tak ihned po dotisknutí neprojevila jako výhodnější.

Hotové vzorky jsem jeden po druhém podrobil tahové zkoušce. Její výsledky prozradily rozdíly v mechanických vlastnostech mezi tiskovými strategiemi. Porovnávány byly hlavně hodnoty smluvní meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti.

Tabulka 10: Průměry naměřených materiálových charakteristik

Parametry	R <sub>p0,2</sub>	směr.	R <sub>m</sub>	směr.	A	směr.	E	směr.
Vzorky	[Mpa]	odchylka	[Mpa]	odchylka	[%]	odchylka	[Gpa]	odchylka
Chess opt.	350,00	89,38	542,33	6,55	25,88	7,94	201,72	6,48
Meander	401,33	43,48	548,00	23,85	29,75	6,44	222,40	2,48
Stripes	389,70	77,35	527,00	5,89	13,40	2,88	214,98	4,95
Chess	357,67	26,64	458,00	20,14	9,90	4,04	207,67	4,38

Tahové zkoušky předcházela vizuální kontrola a přeměření rozměrů, podrobnější analýzu geometrických vlastností jsem provedl až za pomoci simulačního softwaru Ansys Additive. Simulaci, která zahrnovala i tepelně-mechanickou analýzu, jsem podrobil čtyři modely. Každý z modelů zastupoval jednu tiskovou strategii. Vyhodnocovaly se hlavně napětové účinky zastoupené napětím von Mises a deformační posuv. Hodnoty posuvu byly spočítány před i po oddělení dílu z tiskové platformy. Rozměrové přesnosti se posuzují pro každou konstrukci individuálně s přihlédnutím na její určení, proto nebyly přesně stanoveny konkrétní hodnoty pro toleranci rozměrů. Maximální hodnota deformačního posuvu na navržených vzorcích byla jedna desetina milimetru. Takovou hodnotu jsem klasifikoval jako přijatelnou, navíc se vyskytovala pouze na malé ploše dílu. Podstatnější tudíž je, že mezi jednotlivými strategiemi neukázaly simulace velké rozdíly. Zapříčinila to nejspíš malá plocha průřezu vzorků, na níž se rozdíly v tiskových strategiích projeví nedostatečně. Vliv měla i jednoduchá konstrukce malých rozměrů, ze které bylo vnesené teplo dobře odváděno okolním práškem. Z pohledu geometrických vlastností jsem všechny vzorky vyhodnotil jako vyhovující.

Na základě výsledků realizovaných v diplomové práci, jsem zvolil jako nejvhodnější tiskovou strategii pro tisk tenkostěnných konstrukcí strategii Meander. Moje volba závisela především na mechanických vlastnostech získaných za pomoci tahové zkoušky. Zvolená technologie se také nejvíce přiblížila k hodnotám, které udává výrobce prášku v katalogovém listu.

Tabulka 11: Srovnání strategie Meander s katalogovými hodnotami

Parametry	R <sub>p0,2</sub>	směr.	R <sub>m</sub>	směr.	A	směr.	E	směr.
Vzorky	[Mpa]	odchylka	[Mpa]	odchylka	[%]	odchylka	[Gpa]	odchylka
Meander	401,33	43,48	548	23,85	29,75	6,44	222,4	2,48
Katalog	-	-	624 ± 17	-	35 ± 8	-	190 ± 10	-

## Seznam zdrojů

- [1] GREGURIĆ, Leo. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? All3DP [online]. 10.12.2018 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [2] BROWN, MacKenzie. A Brief History of 3D Printing. CAD crowd [online]. 3.5.2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.cadcrowd.com/blog/a-brief-history-of-3d-printing/>
- [3] 3D TISK V KOSTCE. Materiál pro 3D [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/?gclid=CjwKCAiA1L\\_xBRA2EiwAgcLKA5IgQIFo\\_s0-ZRIBeXwT53hPUvbqH1InpSmFXQJ1kcZvZ-jsrhfxBRoCcFsQAvD\\_BwE](https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/?gclid=CjwKCAiA1L_xBRA2EiwAgcLKA5IgQIFo_s0-ZRIBeXwT53hPUvbqH1InpSmFXQJ1kcZvZ-jsrhfxBRoCcFsQAvD_BwE)
- [4] The additive manufacturing landscape 2019: Essential insights into the additive manufacturing market, key trends and analyses. In: AMFG [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: [https://amfg.ai/wp-content/uploads/2019/08/The-Additive-Manufacturing-Landscape-2019\\_Whitepaper.pdf](https://amfg.ai/wp-content/uploads/2019/08/The-Additive-Manufacturing-Landscape-2019_Whitepaper.pdf)
- [5] SHELLABEAR, M. a O. NYRHILÄ. DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART [online]. In: . 2004 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/87af/24fe907c337cdeacfec11c7cf2c5cd0aff7b.pdf>
- [6] ROZKOŠNÝ, Luboš. Technologie DMLS - 3D tisk kovů. MM spektrum [online]. 12.04.2017 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-dmls-3d-tisk-kovu.html>
- [7] Direct Metal Laser Sintering. Kyle Stetz [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://kylestetzerp.wordpress.com/2009/05/20/direct-metal-laser-sintering-dmls/>
- [8] ROZKOŠNÝ, Luboš. Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering. Konstrukter [online]. 9.3.2015 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [9] Technologie aditivní výroby z kovu. Renishaw [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/nase-technologie--27362>
- [10] Arcam EBM. GE [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam>
- [11] EBM: Electron Beam Melting. Cotu [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/122/ebm-electron-beam-melting>

- [12] Electron Beam Melting. Manufacturing guide [online]. [cit. 2020-04-29].  
Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-melting-ebm>
- [13] Binder Jetting: What is Binder Jetting? ExOne [online]. [cit. 2020-04-27].  
Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [14] The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing. 3D natives [online].  
29.7.2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
<https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>
- [15] The Complete Guide to Directed Energy Deposition in 3D Printing. 3D natives [online]. 10.9.2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
<https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [16] Technologie MIM. Vibrom [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
<http://www.vibrom.cz/cz/technologie-mim>
- [17] MCAE a Desktop Metal uvádí u nás kancelářský 3D tisk z kovu. CAD.cz [online].  
[cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/8845-mcae-a-desktop-metal-uvadi-u-nas-kancelarsky-3d-tisk-z-kovu.html>
- [18] Studio System+. Mcae [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
<https://www.mcae.cz/cs/produkty/studio-system/>
- [19] Desktop Metal [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z:  
<https://www.desktopmetal.com/>
- [20] Markforged Metal X. 3D wiser [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
[https://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/?gclid=CjwKCAiAg9rxBRADEiwAxKDTug\\_5VvY5\\_M9hFxQl3O1\\_deEcd9UL6\\_UW TxF57CUfchKvr6I5AIJ2choCtwQQA\\_vD\\_BwE](https://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/?gclid=CjwKCAiAg9rxBRADEiwAxKDTug_5VvY5_M9hFxQl3O1_deEcd9UL6_UW TxF57CUfchKvr6I5AIJ2choCtwQQA_vD_BwE)
- [21] Metal X System. Markforged [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z:  
<https://markforged.com/metal-x/>
- [22] Materiálový slovník. Materialpro 3D [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z:  
<https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [23] Prusa research [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z:  
<https://shop.prusa3d.com/cs/>
- [24] Práškové kovy pro aditivní výrobu. Renishaw [online]. [cit. 2020-04-28].  
Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy-pro-aditivni-vyrobu--31457>



- [25] Nadčasový materiál potkává neomezenou technologií. Materialise [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [26] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. Prášková metalurgie: učební text, scénář, testy [online]. Ostrava, 2013, 153 s. [cit. 2020-04-28]. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [27] MAREK, Pavel. Výroba kovových prášků. MM spektrum [online]. 17.12.2013 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-kovovych-prasku.html>
- [28] A new method of 3D printing living tissues. University of Oxford [online]. 15.8.2017 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: A new method of 3D printing living tissues
- [29] Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering: DMLS. Crucible [online]. [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>
- [30] Začínáme s 3D tiskem kovů: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace). Konstrukter [online]. 26.1.2017 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [31] DRAŠNAR, Martin. Mechanické vlastnosti 3D tištěných vzorků z oceli 316L. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
- [32] GIBSON, Brian. Process Development for Selective Laser Melting of Molybdenum. Research Gate [online]. 10.2018 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/331110596\\_Process\\_Development\\_for\\_Selective\\_Laser\\_Melting\\_of\\_Molybdenum](https://www.researchgate.net/publication/331110596_Process_Development_for_Selective_Laser_Melting_of_Molybdenum)
- [33] Design for metal AM: a beginner's guide. In: LinkedIn [online]. 31.6.2017 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio\\_article-card\\_title](https://www.linkedin.com/pulse/design-metal-am-beginners-guide-marc-saunders/?trk=portfolio_article-card_title)
- [34] JHABVALA, Jamasp, Eric BOILLAT, Thibaud ANTIGNAC a Rémy GLARDON. On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process. Research Gate [online]. 6.2010 [cit. 2020-04-28]. DOI: 10.1080/17452751003688368. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/47366273\\_On\\_the\\_effect\\_of\\_scanning\\_strategies\\_in\\_the\\_selective\\_laser\\_melting\\_process](https://www.researchgate.net/publication/47366273_On_the_effect_of_scanning_strategies_in_the_selective_laser_melting_process)

- [35] EICHLER, Fabian, Marco SKUPIN, Laura THURN, Susanne KASCH a Thomas SCHMIDT. Operating limits for beam melting of glass materials. Research Gate [online]. 1.2019 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/337675409\\_Operating\\_limits\\_for\\_beam\\_melting\\_of\\_glass\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/337675409_Operating_limits_for_beam_melting_of_glass_materials)
- [36] Optimising supports for complex components. Inside metal additive manufacturing [online]. 2015 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/design-optimising-supports-for-complex-components>
- [37] Možnost replikace rozstříkovacích trysek metodou 3D tisku. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [38] Metal Additive Manufacturing: A simulation provider's perspective. Metal Additive Manufacturing [online]. 2018, 2018, (3), 196 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-magazine-archive/metal-additive-manufacturing-vol-4-no-3-autumn-2018/>
- [39] BANKS, Jerry. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley, 1998. ISBN 9780470172445.
- [40] 3D Printed Hood Hinge Demonstrates Potential of Additive Manufacturing for Automotive Production. Additive Manufacturing Today [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://additivemanufacturingtoday.com/3d-printed-hood-hinge-demonstrates-potential-of-additive-manufacturing-for-automotive-production>
- [41] MITCHELL, Richard. Heat Maps Help Engineers Determine Build Orientations for Additive Manufacturing. Ansys: Blog [online]. 18.6.2018 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/heat-maps-determine-build-orientations-additive-manufacturing>
- [42] VRBKA, Martin a Michal VEVERKA. Metoda konečných prvků – MKP. In: Shigley.cz [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [43] STARK, Alexander. Simulation Improves Process Reliability in Metal 3D Printing. Spotlightmetal [online]. 4.6.2019 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.spotlightmetal.com/simulation-improves-process-reliability-in-metal-3d-printing-a-833511/>

- [44] 10 Companies Offering Cutting - Edge 3D Printing Simulation Software. In: AMGF [online]. 20.9.2018 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/09/20/10-companies-offering-cutting-edge-simulation-3d-printing-software/>
- [45] 6 new functions for simulating Additive Manufacturing (3D metal printing). In: SimEvolutio [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <http://www.simevolution.eu/simulation-software/simufact/simufact4>
- [46] Simufact Additive v4 Previewed at TCT Show in Birmingham. Daily CAD CAM [online]. 28.9.2018 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.dailycadcam.com/simufact-additive-v4-previewed-at-tct-show-in-birmingham-uk/>
- [47] GRIFFITHS, Laura. Altair launches Inspire Print3D for additive manufacturing design and simulation. In: TCT Magazine [online]. 25.11.2019 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/altair-inspire-print3d-simulation-additive-manufacturing/>
- [48] Expert Interview: Altair's Ravi Kunju On Simulation Software For 3D Printing. In: AMFG [online]. 20.1.2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2020/01/20/expert-interview-altairs-sr-vp-business-development-strategy-ravi-kunju-on-simulation-software-for-3d-printing/?cn-reloaded=1>
- [49] Print to performer: Simulation for additive manufacturing. Dassault Systèmes [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/trends/digital-additive-manufacturing/>
- [50] RENISHAW. Data sheet - SS 316L-0407 powder for additive manufacturing. Dostupné také z: <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>
- [51] KRÝSTEK, J, S KAŇÁKOVÁ, T KROUPA, P ZIKMUND, P ROUS a F STEINER. Influence of position in 3D printing process on mechanical properties of metal prints. in print.
- [52] WHEELER, Andrew. The Renishaw AM250 Additive Manufacturing System. Engineering.com [online]. 12.8.2015 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10527/T>
- [53] ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jana SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [54] MACEK, Karel a Petr ZUNA. Nauka o materiálu. Praha: ČVUT, 1999.

# Seznam obrázků

Obrázek 1: Časová osa vývoje 3D tisku	10
Obrázek 2: Přehled aditivních technologií	12
Obrázek 3: Princip metody DMLS [7]	14
Obrázek 4: Princip metody EBM [12]	16
Obrázek 5: Princip metody Binder Jetting [14]	17
Obrázek 6: Princip metody DED [15]	18
Obrázek 7: Studio System (tiskárna, debinder, pec) [19]	20
Obrázek 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S [23]	22
Obrázek 9: Velikost zrna práškového kovu [24]	23
Obrázek 10: Tisk dílu se zkosením [29]	27
Obrázek 11: Tisk dílu s otvorem za pomoci optimalizace tvaru [29]	28
Obrázek 12: Tisk dílu s otvorem za pomoci podpory [29]	28
Obrázek 13: Optimální poloha dílu pro tisk bez podpor [29]	28
Obrázek 14: Nevhodná poloha dílu vůči směru nanášení prášku [29]	29
Obrázek 15: Vhodná poloha dílu vůči směru nanášení prášku [29]	29
Obrázek 16: Tisk vysokých dílů se vzájemným propojením [29]	29
Obrázek 17: Optimální pozice objemnějších dílů snižující zbytkové pnutí [29]	30
Obrázek 18: Poloha dílu pro eliminaci pnutí v oblasti platformy [29]	31
Obrázek 19: Díl s bionickou konstrukcí [30]	32
Obrázek 20: Vnitřní nosníkové konstrukce [30]	32
Obrázek 21: Schéma vyplnění plochy šrafy [32]	33
Obrázek 22: Princip strategie Meander [33]	34
Obrázek 23: Princip strategie Stripes [33]	34
Obrázek 24: Princip strategie Chessboard [33]	35
Obrázek 25: Princip strategie Spiral scanning [35]	35
Obrázek 26: Vliv tloušťky vrstev na tvar dílu [36]	36
Obrázek 27: Optimalizace tloušťky jednotlivých vrstev [37]	37
Obrázek 28: Vzdálenost míst natavených laserem [32]	37
Obrázek 29: Melt pool [32]	37
Obrázek 30: Schéma natavených bodů tvořící šrafy [32]	38

Obrázek 31: Vliv pozice ohniska paprsku na velikost natavované oblasti [31]	38
Obrázek 32: Tvarová přesnost topologicky optimalizovaného pantu kapoty automobilu [40]	40
Obrázek 33: Automatické generování podpor [41]	41
Obrázek 34: Prvky s různým počtem uzlových bodů [43]	42
Obrázek 35: Prostředí programu Simufact Additive – asistent pro umístění dílu na platformu [46]	45
Obrázek 36: Prostředí programu Altair Inspire Print3D [47]	46
Obrázek 37: Rozměry CAD modelu zkušebního tělesa	49
Obrázek 38: Tisková platforma s hotovými díly	54
Obrázek 39: Rozměry CAD modelu zkušebního tělesa s podporami	54
Obrázek 40: Tiskárna Renishaw AM250 [52]	55
Obrázek 41: Vytisknuté vzorky pro zkoušku tahem	60
Obrázek 42: Výkres zkušebního tělesa	61
Obrázek 43: Trhací stroj LabTest 5.100SP1	63
Obrázek 44: Vzorek A2 po přetržení	66
Obrázek 45: Vzorek A3 po přetržení	67
Obrázek 46: Vzorek A6 po přetržení	68
Obrázek 47: Vzorek B1 po přetržení	69
Obrázek 48: Vzorek B4 po přetržení	70
Obrázek 49: Vzorek B5 po přetržení	71
Obrázek 50: Vzorek C1 po přetržení	72
Obrázek 51: Vzorek C1 při zkoušce tahem	72
Obrázek 52: Vzorek C2 po přetržení	73
Obrázek 53: Vzorek C5 po přetržení	74
Obrázek 54: Vzorek C5 při zkoušce tahem	74
Obrázek 55: Vzorek D2 po přetržení	75
Obrázek 56: Vzorek D4 po přetržení	76
Obrázek 57: Vzorek D6 po přetržení	77
Obrázek 58: Vzorek A s podpěrami po nahrání dat do Ansys Additive	79
Obrázek 59: Souhrnné informace po dokončení simulace	80
Obrázek 60: Vzorek A – napětí von Mises	80
	93

Obrázek 61: Napětí von Mises u všech vzorků	81
Obrázek 62: Deformační posuv před oddělením vzorků z tiskové platformy	82
Obrázek 63: Deformační posuv po oddělení vzorků z tiskové platformy	83

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení AISI 316L [%] [50]	49
Tabulka 2: Charakteristiky materiálu AISI 316L dle katalogového listu Renishaw [50]	50
Tabulka 3: Parametry tisku (1)	51
Tabulka 4: Parametry tisku (2)	52
Tabulka 5: Rozměry CAD modelu	61
Tabulka 6: Skutečné rozměry zkušebních těles	61
Tabulka 7: Parametry trhacího stroje LabTest 5.100SP1	62
Tabulka 8: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou	65
Tabulka 9: Naměřené a katalogové materiálové charakteristiky	78
Tabulka 10: Průměry naměřených materiálových charakteristik	86
Tabulka 11: Srovnání strategie Meander s katalogovými hodnotami	86

## Seznam grafů

Graf 1: Nárůst výrobců 3D tiskáren kovu [4]	12
Graf 2: Diagram zkoušky tahem – vzorek A2	66
Graf 3: Diagram zkoušky tahem – vzorek A3	67
Graf 4: Diagram zkoušky tahem – vzorek A6	68
Graf 5: Diagram zkoušky tahem – vzorek B1	69
Graf 6: Diagram zkoušky tahem – vzorek B4	70
Graf 7: Diagram zkoušky tahem – vzorek B5	71
Graf 8: Diagram zkoušky tahem – vzorek C1	72
Graf 9: Diagram zkoušky tahem – vzorek C2	73
Graf 10: Diagram zkoušky tahem – vzorek C5	74
Graf 11: Diagram zkoušky tahem – vzorek D2	75
Graf 12: Diagram zkoušky tahem – vzorek D4	76
Graf 13: Diagram zkoušky tahem – vzorek D6	77



# Seznam zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADAM	Atomic diffusion additive manufacturing
AM	Additive manufacturing
CAD	Computer aided design
DED	Direct energy deposition
DMLM	Direct metal laser melting
DMLS	Direct metal laser sintering
EBM	Electron beam melting
FDM	Fused deposition modeling
FEM	Finite element method
FFF	Fused filament fabrication
HIP	Hot isostatic pressing
MIM	Metal injection moulding
MKP	Metoda konečných prvků
PLA	Polylactic acid
ppm	Parts per million
SLA	Stereolithography
SLM	Selective laser melting
SLS	Selective laser sintering
SPS	Spark plasma sintering
STL	Stereolithography